

Aus dem Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie
der Universität München
Vorstand: Prof. Dr. med. H. Drexel

**ENTWICKLUNG EINES DIGITALISIERTEN SPEKTROMETERS
ZUR BESTIMMUNG DER THEORETISCHEN
ERYTHEMWIRKSAMKEIT VERSCHIEDENER UV-STRAHLER
UND VERGLEICH DER BIOLOGISCHEN WIRKUNG
MIT DEN VORAUSBERECHNUNGEN**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Walter Schnell
aus Schwabmünchen
1985



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554811_0044

Aus dem Institut für Medizinische Balneologie und
Klimatologie der Universität München
Vorstand: Prof. Dr. med. H. Drexel

Entwicklung eines digitalisierten Spektrometers zur
Bestimmung der theoretischen Erythemwirksamkeit ver-
schiedener UV-Strahler und Vergleich der biologischen
Wirkung mit den Vorausberechnungen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Walter Schnell

aus

Schwabmünchen

1985

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität München

Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. Dipl. Phys.
J. Kleinschmidt
Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. H. Drexel
Dekan: Prof. Dr. med. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 1985

INHALTSVERZEICHNIS

<u>I. Einleitung</u>	1
1. <u>Die Entwicklung der Lichttherapie</u>	1
2. <u>Einführung in die Problemstellung</u>	2
3. <u>Zielsetzung der Arbeit</u>	3
 <u>II. Konzeption eines Spektrometers mit digitaler Ausgabe</u>	 5
 <u>III. Die Konstruktion und Ausführung</u>	 7
1. <u>Das Spektrometer</u>	7
2. <u>Die Einkopplung der Strahlung</u>	7
2.1. Forderung an die Strahleinkopplung	7
2.2. Die Strahleinkopplung - Literaturstudium und Entwicklung	9
2.3. Die Ausführung der Strahleinkopplung	11
2.4. Qualitätsüberprüfung der Strahleinkopplung	13
3. <u>Die Registrierung der Strahlung</u>	15
3.1. Aufbau und Funktion des Photomultipliers	15
3.2. Die Registrierung des Photomultiplierstroms	16
3.3. Die Linearität des Photomultipliers	17
3.4. Die Verstärkung des Photomultipliers	17
3.5. Die optimale Betriebsspannung	18
3.6. Die dynamische Verstärkung - der Spannungsteiler	19

3.7.	Möglichkeiten zur Änderung der Empfindlichkeit	20
3.8.	Die Korrektur des Dunkelstroms	23
4.	<u>Die Verstellung der Wellenlänge</u>	24
4.1.	Die Arbeitsweise eines Schrittmotors	24
4.2.	Vorteile eines Schrittmotors	25
4.3.	Die Dimensionierung und Ausführung der Schrittmotor-Getriebe-Einheit	27
4.4.	Die elektronische Steuerung des Schrittmotors	28
4.4.1.	Die Ansteuerung des Schrittmotors	31
4.4.2.	Die Stromversorgungseinheit	32
4.4.3.	Das Interface	35
5.	<u>Die Arbeitsweise der gesamten Anlage</u>	37
6.	<u>Bedienung und Einstellwerte der Apparatur</u>	40

IV. Eichung und Qualitätsüberprüfung der

<u>Apparatur</u>	43
1. <u>Die Zuordnung Wellenlänge-Schrittzahl</u>	43
1.1. Die Wellenlängeneichung	43
1.2. Diskussion der Wellenlängenkurve	45
2. <u>Die Intensitätseichung</u>	46
2.1. Grundsätzliches zur Eichung	46
2.2. Die Auswahl der Eichquelle	47
2.3. Die Durchführung der Intensitäts- eichung	48
2.4. Die Eichfunktion	50
3. <u>Einige Messungen zu Prüfzwecken</u>	53
4. Die Genauigkeit der Eichung	54

V. Die Verarbeitung der Daten	57
1. <u>Einige Grundbegriffe und Definitionen</u>	57
2. <u>Die einzelnen Schritte der Aufbereitung der Daten</u>	58
2.1. Die Rohdaten	58
2.2. Die Einspeicherung der Rohdaten	59
2.3. Die Umrechnung mit Hilfe der Eichkurve	60
2.4. Die Bewertung mit einer Wirkungsfunktion	61
2.5. Die Entzerrung auf eine lineare Wellenlängenskala	61
2.6. Die Berechnung von Integralen	66
2.7. Die Ausgabe der Meßergebnisse und die Normierung	67

VI. <u>Die biologische Wirkung der UV-Strahlung auf die Haut - Literaturübersicht und Planung der Messungen</u>	70
1. <u>Der biologisch bedeutsame UV-Bereich</u>	70
2. <u>Die direkte Pigmentierung</u>	71
3. <u>Die Erythemwirksamkeit der UV-Strahlung</u>	73
4. <u>Die Auswahl geeigneter Wirkungsfunktionen</u>	79
5. <u>Einige Bemerkungen zur biologisch wirksamen Bestrahlungsstärke</u>	83

<u>VII</u>	<u>Die Messung der Spektren und die Bestimmung einiger Kenndaten von UV-Strahlern</u>	86
1.	<u>Die verwendeten UV-Strahlenquellen</u>	86
2.	<u>Der Quecksilberdampf-Hochdruckbrenner und sein Spektrum</u>	88
3.	<u>Die Durchführung der Messungen</u>	89
4.	<u>Die Spektren - Meßergebnisse und abgeleitete Größen</u>	91
5.	<u>Diskussion der Spektralverteilung der einzelnen Strahlenquellen</u>	107
5.1.	Hafi 500 HANAU	107
5.2.	HANAU 3020	107
5.3.	Solarium HANAU de Luxe	108
5.4.	HANAU 3030	108
5.5.	Der Einfluß der zuschaltbaren Filter	109
5.6.	Die pigmentwirksame Bestrahlungstärke	110
5.7.	Die erythemwirksame Bestrahlungsstärke	111
5.8.	Einige Bemerkungen zu den Meßergebnissen	113
<u>VIII.</u>	<u>Biologische Messungen</u>	115
1.	<u>Die Auswahl der Strahlenquellen</u>	115
2.	<u>Die Methode der Zeitquotienten-Bildung</u>	116
3.	<u>Die Messung des Erythemgrades</u>	117
3.1.	Möglichkeiten zur Messung eines Erythems	117
3.2.	Methodische Schwierigkeiten mit dem vorhandenen Erythemmeßgerät	119
3.3.	Verbesserungen am Erythemmeßgerät	121

3.4.	Die Durchführung der Erythemmessung	123
3.5.	Die Genauigkeit der Erythemmessung	123
4.	<u>Die Durchführung der Messungen</u>	125
4.1.	Die Versuchspersonen	125
4.2.	Der Ablauf der UV-Bestrahlung	125
5.	<u>Die Meßergebnisse der UV-Bestrahlung</u>	125
6.	<u>Diskussion der biologischen Messungen</u>	132
7.	<u>Ausblick</u>	136

<u>IX. Zusammenfassung</u>	138
----------------------------	-----

<u>X. Literaturverzeichnis</u>	140
--------------------------------	-----

<u>XI. Anhang</u>	147
-------------------	-----

I. Einleitung

1. Die Entwicklung der Lichttherapie

Die Anwendung des Sonnenlichtes zu therapeutischen Zwecken ist von praktisch allen menschlichen Kulturen überliefert. Die wissenschaftliche Untersuchung der Lichttherapie beginnt Anfang des 19. Jahrhunderts. J. W. DÖBEREINER (40) unterscheidet die Wärmewirkung von der Wirkung verschiedener Farben. Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts begründet N. R. FINSSEN (13) die aktinische Therapie. Er beschreibt den kurzwelligen Anteil des Sonnenlichts als den für die therapeutische Anwendung wichtigsten Anteil und führt die Bestrahlungstherapie des Lupus ein, wobei er erstmals auch auf künstliche Lichtquellen zurückgreift (Kohlebogenlampe). Zu Beginn unseres Jahrhunderts wird durch O. BERNHARD (4) die hohe UV-Strahlungsenergie der Hochgebirgssonne vor allem zur Therapie der Tuberkulose eingesetzt. Im Handbuch der Balneologie, medizinischen Klimatologie und Balneographie von 1924 (9) sind bereits zahlreiche Krankheitsbilder aus dem Gebiet der Chirurgie und Inneren Medizin als Indikation zur unterstützenden Sonnenlichtbehandlung genannt.

Die Erzeugung eines sonnenähnlichen Spektrums durch künstliche Strahlenquellen mit hohem UV-Anteil ermöglicht wiederholte Bestrahlungen mit reproduzierbarer Dosis unabhängig von der Sonneneinstrahlung und eröffnet neue Möglichkeiten. Der bei der Sonnenlichttherapie bedeutende psychotrope Effekt sowie die Wärmewirkung des infraroten Anteils verlieren dabei gegenüber der Wirkung des UV-Anteils an Bedeutung. Neben speziellen Eigenschaften, wie etwa

der bakteriziden oder mitosehemmenden Wirkung, steht die unspezifische Reizwirkung, die bei der Bildung eines UV-Erythems ausgelöst wird, im Vordergrund. Diese soll durch Einflußnahme auf die endogene Regulation beispielsweise die körperliche Abwehr stimulieren und so zur Überwindung bzw. Verhütung einer Krankheit beitragen. Daneben gewinnt heute mehr und mehr der kosmetische Effekt der Bräunung an Bedeutung, der zur weiten Verbreitung künstlicher UV-Strahler geführt hat.

2. Einführung in die Problemstellung

Erste Untersuchungen über die Wellenlängenabhängigkeit der Erythem-erzeugung veröffentlichen HAUSSER und VAHLE (18) im Jahr 1921. Verbesserte Messungen folgen unter anderem von COBLENTZ und STAIR (8) und LUCKIESH et al. (32). Gemeinsam ist diesen Messungen ein ausgeprägtes Minimum der Erythemempfindlichkeit bei 280 nm, die Empfindlichkeit steigt sowohl zu kurzen wie zu längeren Wellenlängen hin an. Eine ähnliche Erythem-wirkungsfunktion, die auf Messungen von URBACH et al. (63) zurückgeht, wurde unter der Annahme einer allgemeinen Gültigkeit in die DIN 5031* aufgenommen. Es gibt jedoch mehrere Veröffentlichungen, die eine zu kürzeren Wellenlängen stetig zunehmende Erythemempfindlichkeit postulieren, wobei besonders die Arbeitsgruppe um EVERETT, OLSON und SAYRE (46, 47) mit Hilfe eines lichtstarken UV-Monochromators zahlreiche Messungen durchführte. Die Diskrepanz zwischen diesen Gruppen von Erythemwirkungsfunktionen wurde bisher wenig beachtet. Ungeklärt ist die Frage, inwieweit

* DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Vornorm, Teil 10 (November 1979)

es sich dabei um interindividuelle Schwankungen handelt und somit das Postulat einer einheitlichen Erythemempfindlichkeit nicht mehr haltbar ist. Ebenso wenig ist die biologische Relevanz der unterschiedlichen Wirkungsfunktionen bekannt in dem Sinne, ob bei Bestrahlung mit UV-Strahlern bei Bewertung mit verschiedenen Erythemwirkungsfunktionen ein relevanter Unterschied zu erwarten ist und somit dies bei der Bestrahlungsplanung berücksichtigt werden müßte.

3. Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Spektrometers zur automatischen Messung der UV-Strahlung beliebiger UV-Strahlenquellen. Mit verschiedenen Einfallswinkeln einfallende Strahlung soll gemäß dem Cosinusetz registriert werden. Die auf Lochstreifen zu speichernden Spektren sollen mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung weiterverarbeitet werden, dabei werden zuvor gewonnene Eichwerte berücksichtigt. Durch Bewertung mit den zugehörigen Wirkungsfunktionen können dann die erythem- bzw. pigmentwirksame Bestrahlungsstärke für verschiedene Strahlungsquellen und Wirkungsfunktionen bestimmt werden. Bei Berücksichtigung der gewonnenen Werte sollte sich daraus die für die verschiedenen Strahlenquellen optimale Einsatzmöglichkeit ableiten lassen.

Im zweiten Teil der Arbeit soll die Erythembildung einiger Versuchspersonen bei Bestrahlung mit zwei Strahlenquellen bestimmt werden, bei denen aufgrund der theoretischen Berechnungen besonders große Unterschiede in der Erythembildung für den Fall zu erwarten sind, daß die Erythemempfindlichkeit einer Versuchsperson von der in der DIN 5031 festgelegten

Erythemwirkungsfunktion abweicht. Zur genauen Quantifizierung des Erythems sind einige Verbesserungen an einem vorhandenen Erythemmeßgerät notwendig, insbesondere muß die Forderung nach berührungsloser Messung erfüllt werden, um nicht durch leichten Druck auf das Erythem den Erythemgrad zu beeinflussen. Durch gezielte Auswertung der erhaltenen Meßwerte soll dann geklärt werden, ob das Postulat einer einheitlichen Erythemempfindlichkeit erfüllt ist, oder ob sich relevante, biologisch meßbare Abweichungen ergeben. Zusätzlich soll untersucht werden, ob die biologische Variabilität durch die bekannten Erythemwirkungsfunktionen erfaßt ist, oder ob darüber hinausgehende Abweichungen auftreten.

II. Konzeption eines Spektrometers mit digitaler Ausgabe

Die gestellte Aufgabe mit Messung mehrerer Lampen und Berechnung der erythem- bzw. pigmentwirksamen Bestrahlungsstärke läßt sich mit vertretbarem Aufwand nur lösen, wenn die Messung weitgehend automatisiert abläuft und die Berechnung mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung durchgeführt werden kann. Im Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie vorhandene Geräte sollten aus Kostengründen soweit wie möglich integriert werden.

Basis der Apparatur ist ein UV-Spektrometer der Fa. BECKMAN mit Registrierung über einen Photomultiplier. Der Antrieb der Wellenlängenachse erfolgte bisher über einen Wechselstrommotor mit stufenlosem Getriebe. Vorversuche zeigten, daß das pro Zeiteinheit durchgeführte Wellenlängenintervall sehr stark von der Erwärmung (Verminderung der inneren Reibung), somit also von der Betriebsdauer abhing. Außerdem war eine kontinuierliche Wellenlängenänderung während der Messung selbst bei Verbesserung des Antriebs nur schwer mit einer elektronischen Datenverarbeitung zu koppeln. Eine schrittweise Wellenlängenverstellung mit Stillstand während der Meßzeit könnte durch intermittierendes Einschalten des vorhandenen Antriebs erreicht werden, eine reproduzierbare Schrittweite würde jedoch einen beträchtlichen Regelaufwand mit Rückkopplung über einen unabhängigen Positionsmesser nötig machen. Technisch eleganter und weitaus zuverlässiger läßt sich die Wellenlängenverstellung mit Hilfe eines Schrittmotors bewegen. Daher wurde ein Schrittmotorantrieb mit Zwischengetriebe und elektronischer Steuereinheit mit Interface zur externen Ansteuerung durch ein Programmteil konzipiert.

Eine weitere Schwierigkeit bereitete die Einkopplung der Strahlung ins Spektrometer, dessen Eintrittsspalt sich an einer Stirnseite und somit an einer senkrechten Fläche befindet. Der Öffnungswinkel des Spektrometers beträgt dabei nur wenige Grad. Nach Vorversuchen konnte ein Einkopplungsvorsatz mit weitem Öffnungswinkel, geeigneter Winkelverteilung und horizontal liegender Auffangfläche verwirklicht werden.

Zur Registrierung sollte ein Analog-Digital-Wandler mit kleiner Steuereinheit und 5-Kanal-Lochstreifenstanzer verwendet werden. Übertragungsglieder sind für ein fehlerloses Zusammenwirken aller Teile erforderlich.

III. Die Konstruktion und Ausführung

1. Das Spektrometer

Als Spektrometer wird der optische Teil eines Spektralphotometers der Fa. BECKMAN Instruments* verwendet. Es umfaßt den Wellenlängenbereich von 190 - 2000 nm. Als dispergierendes Element wird ein Quarzprisma verwendet, das in LITTROW-Anordnung gemäß Abb. 1 angeordnet ist. Ein- und Austrittsspalt befinden sich an der Stirnseite des Spektrometers, die Spaltbreite beider Spalte wird über einen Stellknopf gleichsinnig verändert. Zur Wellenlängenabstimmung wird das Quarzprisma geneigt, der Kollimatorspiegel ist fest montiert. Mit Hilfe einiger Hg-Spektrallinien wurde die Wellenlängenskala speziell für den UV-Bereich neu justiert, es konnte eine Wellenlängengenauigkeit von 0,15 nm für den Bereich 200 - 400 nm erreicht werden.

2. Die Einkopplung der Strahlung

2.1. Forderungen an die Strahleinkopplung

Der Eintrittsspalt befindet sich an der Stirnseite des Spektrometers in unmittelbarer Nähe des Austrittsspalt. Es wird nur solche Strahlung registriert, die mit einem Öffnungswinkel von einigen Grad und in horizontaler Richtung einfällt. Für die Messung von UV-Lampen ist dies aus zwei Gründen nicht günstig: Die Mehrzahl der UV-Lampen ist für die Bestrahlung einer horizontal liegenden Fläche eingerichtet - dies ließe sich durch einen Umlenkspiegel eventuell aus-

* Modell DU der Fa. BECKMAN Instruments GmbH
München 45

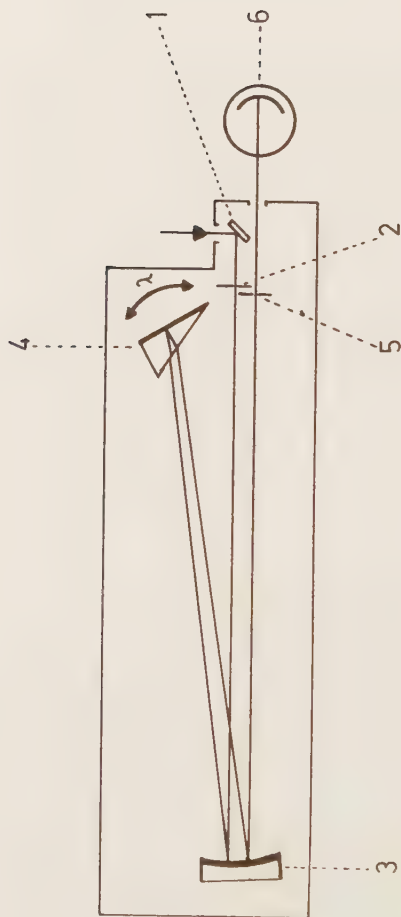


Abb. 1: Der optische Aufbau des Spektrometers (Littrow-Anordnung)

Die Strahlung tritt durch die Eintrittsöffnung ein und beleuchtet, durch den Umlenkspiegel (1) um 90° gespiegelt, den Eintrittsspalt (2). Der Kollimatorspiegel (3) reflektiert die durch den Eintrittsspalt eintretende Strahlung als paralleles Bündel auf das auf seiner Rückseite verspiegelte Quarzglasprisma (4) und bildet das dispersierte Spektrum in der Ebene des Austrittsspalt (5) ab, die durch den Austrittsspalt selektierte Wellenlänge wird im Photomultiplier (6) gemessen. Die Wellenlängenverstellung wird durch Drehen des Quarzprismas vorgenommen. Ein- und Austrittsspalt sind in Wirklichkeit übereinander angeordnet und miteinander fixiert, die Spaltweite beider Spalte wird parallel verändert.

gleichen. Schwerwiegender ist, daß infolge des sehr kleinen Öffnungswinkels jeweils nur ein sehr kleiner Ausschnitt der Lampe vermessen wird (etwa 2 mm x 14 mm, je nach Abstand) und somit eine Bestrahlungs Lampe mit mehreren Strahlern oder ein Strahler mit Reflektor nicht vermessen werden könnten.

Eine ideale Strahleinkopplung sollte folgende Eigenschaften erfüllen:

- Eine Bestrahlung im vertikalen Strahlengang muß möglich sein, die Eintrittsöffnung sollte also horizontal liegen.
- Alle auf eine Einheitsfläche aus verschiedenen Richtungen des Raumes auftreffende Strahlung muß registriert werden, da mit der zu entwickelnden Apparatur UV-Dosimetrie betrieben werden soll (Es können dann auch größere Lampen mit Reflektor untersucht werden).
- Die Strahleinkopplung muß die einfallende Strahlung mit dem Cosinus des Einfallswinkels bewerten, da nach HENSCHKE (21) das UV-Erythem eine Winkelabhängigkeit gemäß dem Cosinusetz zeigt.

2.2. Die Strahleinkopplung - Literaturstudium und Entwicklung

Bereits 1930 beschreibt ULBRICHT (61) das nach ihm benannte Kugelphotometer zur Messung der Strahlstärke einer Lichtquelle. DRESLER (10) untersuchte die Anordnung bei Aufheben einiger Symmetriebedingungen. Speziell zur Messung von Bestrahlungsstärken im UV-Bereich gab LARCHÉ (30) Maße einer speziellen Kugel mit Schatter zur Abschirmung vor direkt auf die Meßzelle fallendem Licht an. BUDDE (6) konnte zeigen,

daß durch eine mattierte Quarzplatte in der Eintrittsöffnung auf den Schatter verzichtet werden kann.

Das Prinzip dieser Meßhilfsgeräte ist, durch Abschirmen der Meßzelle vor direkt einfallender Strahlung nur mindestens einmal an einer Fläche "reflektierte" Strahlung zu registrieren und auf diese Weise eine Integration gemäß dem Cosinusetz zu erreichen. Alle Oberflächen müssen hierzu eine möglichst hohe, aber diffuse "Reflexion" besitzen.

Eine Strahleinkopplung in Form einer Kugel läßt sich wegen der ungünstigen Lage des Eintrittsspalt am Spektrometer (neben dem Austrittsspalt) nur in etwa 20 cm Entfernung vom Spektrometer aufstellen, da unmittelbar am Austrittsspalt das Gehäuse für den Photomultiplier angebracht ist. Dies brächte größere Schwierigkeiten beim Justieren der Apparatur mit sich, noch gravierender ist jedoch, daß die Anlage nach dem Justieren praktisch nicht mehr bewegt werden dürfte.

HELWIG (20) zeigt nun, daß nicht unbedingt eine Anordnung mit hoher Symmetrie notwendig ist, er erhält auch bei einer quaderförmigen Anordnung mit einer außerhalb von Symmetrieebenen gelegenen Auskopplungsöffnung zufriedenstellende Ergebnisse.

Eigene Vorversuche mit einer im Winkel zwischen Spektrometer und Photomultipliergehäuse angebrachten Strahleinkopplung zeigten, daß dieser Weg prinzipiell möglich sein müßte. Neben der Suche nach einer geeigneten Form bereitete es vor allem Schwierigkeiten, eine für eine hohe UV-Remission brauchbare Oberfläche zu erzielen. Magnesiumoxid aufzudampfen, wie allgemein empfohlen wird, führt zu keiner haltbaren Oberfläche. Eine Paste aus Magnesiumoxid und Wasserglas läßt sich zwar besser verarbeiten, jedoch treten

nach einiger Zeit ausgeprägte Schwundrisse auf. Nach SCHRÖDER (50) ergeben Teflon-Flocken, aufgesintert auf eine Metalloberfläche, eine stabile Oberfläche mit hoher Remission. Angeregt durch diese Auskunft wurden solide Teflonplatten auf ihre UV-Remission hin untersucht. Durch feinstes Abdrehen der Oberfläche auf einer Feindrehbank konnte die Remission um etwa 20 % gesteigert werden.

Nach drei Versuchsmodellen konnte schließlich eine Strahleinkopplung entwickelt werden, die eine ausreichend hohe Strahlungsausbeute sowie eine sehr gute Erfüllung des Cosinusetzes ergab. Die Eintrittsöffnung ist durch eine dünne feinmattierte Teflonscheibe abgedeckt, ein Schatter mit dem dadurch hervorgerufenen Intensitätsverlust konnte entfallen.

2.3. Die Ausführung der Strahleinkopplung

Die Abb. 2 zeigt die verwendete Strahleinkopplung im Querschnitt und in Schrägansicht. Sie ist aus 8 mm starkem Teflon gefertigt, das auf der Innenseite durch Abdrehen feinst mattiert ist. In einer quaderförmigen Grundstruktur befindet sich oben die Eintrittsöffnung mit einem Durchmesser von 25 mm, über die Eintrittsöffnung ist eine 0,15 mm starke Teflonscheibe mit Hilfe eines abgefasten Messingringes gespannt, die Teflonscheibe ist mattiert. Der Quader fügt sich in die Ecke zwischen Photomultipliergehäuse und Spektrometer-Stirnwand (Vgl. Abb. 10). Gegenüber dem Eintrittsspalt des Spektrometers ist in den Quader eine schlitzförmige Öffnung eingefräst, sie liegt wegen der ungünstigen Lage des Eintrittsspaltess weit seitlich in der Nähe einer Seitenwand. Der Boden des Quaders ist etwa zu zwei Dritteln mit 45° abge-

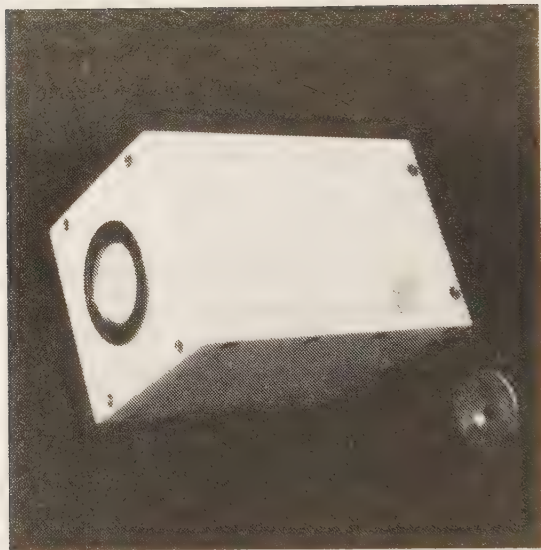
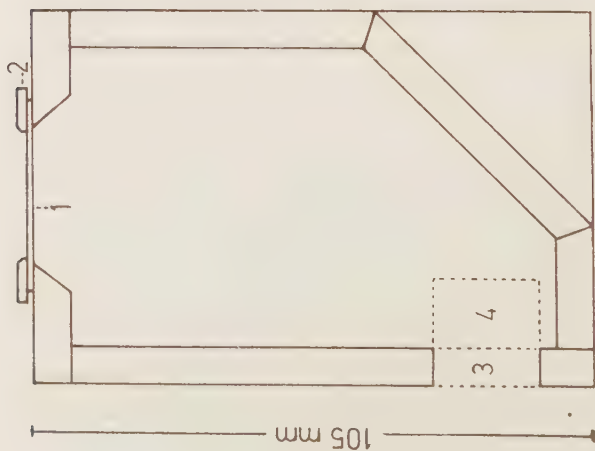


Abb. 2: Die Strahleinkopplung

Links ist ein schematischer Querschnitt durch die Strahleinkopplung dargestellt. Über die Eintrittsöffnung (1) mit Hilfe eines abgefasten Messingringes (2) gespannt. Die Austrittsöffnung (3) ist in der Nähe der Seitenwand angebracht, aus der ein keilförmiger Anteil (4) ausgefräst ist, um den Strahlengang nicht zu beeinträchtigen. Rechts ist eine Schrägansicht der Strahleinkopplung abgebildet, Eintrittsöffnung und Austrittsöffnung sind sichtbar. Im Vordergrund die Messingblende zur Empfindlichkeitsanpassung.

schrägt. Die Strahleinkopplung steht auf einer am Spektrometergehäuse befestigten Grundplatte, wegen der Einpassung in eine Ecke ist jeweils eine reproduzierbare Aufstellung gewährleistet. Durch Auflegen einer Messingscheibe mit einer Öffnung von 5,5 mm Durchmesser über die Eintrittsöffnung kann die Eintrittsfläche auf etwa ein Zwanzigstel reduziert werden.

2.4. Qualitätsüberprüfung der Strahleinkopplung

Während die Wellenlängenabhängigkeit der Transmission der Strahleinkopplung nicht wichtig ist - dies wird bei der unten beschriebenen Eichung* voll kompensiert - spielt die Winkelabhängigkeit besonders bei Messungen an großflächigen Lampen eine wichtige Rolle. Die Winkelabhängigkeit wurde daher bei 366 nm in Schritten von je 10° bis $\pm 60^\circ$ bestimmt, bei 30° und 60° wurde zusätzlich auch bei kürzeren Wellenlängen (280 nm) gemessen, um eine größere Wellenlängenabhängigkeit auszuschließen. Die Abb. 3 zeigt die Meßergebnisse in grafischer Darstellung, zusätzlich ist eine Cosinusfunktion als Kurvenzug dargestellt. Die Meßergebnisse decken sich im Rahmen der Meßgenauigkeit für kleine Winkel weitgehend mit der Cosinuskurve, bei größeren Winkeln tritt eine Intensitätsabnahme gegenüber einer Cosinusverteilung auf, die für kürzere Wellenlängen deutlicher ist als für lange Wellen. Bei einem Bestrahlungsabstand von 1 m werden für Lampen üblicher Größe kaum Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$ erreicht, in diesem Bereich ist das Cosinusgesetz sehr gut erfüllt. Die Abweichung bei größeren Winkeln und der nicht ganz symmetrische Verlauf in der Ebene parallel zur Längsachse des Spektrometers sind auf die stark unsymmetrische Konstruktion mit seitlich liegender

* Eichung im Rahmen dieser Arbeit im Sinne von Kalibrierung

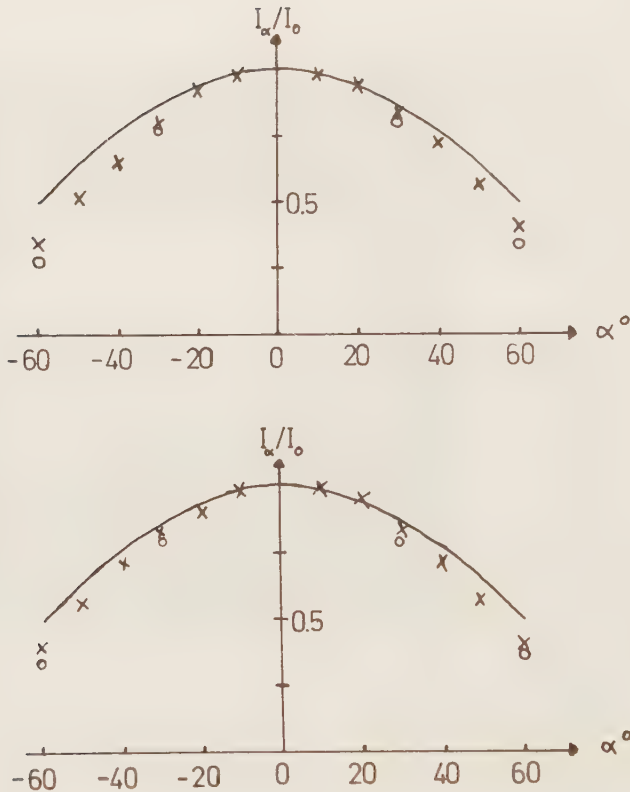


Abb. 3: Die Winkelabhängigkeit der Intensität

Das Verhältnis I_α/I_0 , berechnet aus der beim Einfallswinkel α gemessenen Intensität I_α zu der bei senkrechtem Einfall gemessenen Intensität I_0 , ist aufgetragen gegen den Einfallswinkel α , der den Winkel gegen die Normale zur Eintrittsfläche angibt.

Die obere Darstellung gibt die Winkelabhängigkeit parallel zur Längsrichtung des Spektrometers wieder, unten ist die dazu senkrechte Richtung dargestellt. Positive Winkel zeigen Neigungswinkel weg vom Spektrometer - bzw. Photomultipliergehäuse an.

- x Messung bei 366 nm
- o Messung bei 280 nm
- Cosinusfunktion

Austrittsöffnung zurückzuführen, bei praktischen Messungen jedoch ohne Belang.

3. Die Registrierung der Strahlung

Eine Abschätzung der aus dem Austrittsspalt austretenden Energie ergibt einen Lichtstrom in der Größenordnung von 10^{-11} W (Anhang 1). Halbleiterempfänger, selbst mit integriertem Vorverstärker, sind nicht geeignet, so kleine Energieströme zu registrieren. Allein Photomultiplier mit ihrer sehr hohen Verstärkung sind in der Lage, so kleine Energieströme zu messen. Zur Verfügung stand ein UV-empfindlicher Photomultiplier (RCA 1 P 28), der schon früher in Messungen mit dem Spektrometer verwendet wurde. Der Photomultiplier ist in einem Gehäuse hinter dem Austrittsspalt des Spektrometers montiert.

3.1. Aufbau und Funktion des Photomultipliers

Ein Photomultiplier hat folgenden prinzipiellen Aufbau: Einer Photokathode aus einem im zu messenden Wellenlängenbereich brauchbaren Material sind acht bis zehn Dynoden genannte Platten in spezieller Anordnung nachgeschaltet. Die Dynoden bestehen aus einem Material mit hoher Ausbeute an Sekundärelektronen bei Aufprall langsamer Primärelektronen. Eine Auffangelektrode fängt die aus der letzten Dynode freigesetzten Elektronen auf. Die ganze Anordnung ist im Hochvakuum in einem UV-durchlässigen Glaskolben eingeschmolzen.

Beim 1 P 28 besteht die Photokathode aus einer Cäsium-Antimonlegierung, neun Dynoden sind nachgeschaltet. An den Photomultiplier wird eine Hochspannung von

etwa 1000 V angelegt, ein Widerstandsnetzwerk hält einen Spannungssprung von je etwa 100 V von Elektrode zu Elektrode aufrecht. Von der Photokathode bzw. einer Dynode ausgelöste Elektronen werden durch das elektrische Feld beschleunigt und auf die nächste Dynode fokussiert, wo sie wiederum Sekundärelektronen loslösen. Gelingt es, durch eine spezielle Anordnung und Formgebung der Dynoden möglichst viele der ausgelösten Elektronen auf die nächstfolgende Dynode aufprallen zu lassen und werden aus dem Dynodenmaterial durch ein auftreffendes Elektron im Mittel mehr als ein Sekundärelektron ausgelöst, kommt eine Elektronenlawine zustande, die einen meßbaren Strom an der Auffangelektrode ergibt.

3.2. Die Registrierung des Photomultiplier-Stroms

Die Auffangelektrode wird über einen Ableitwiderstand geerdet, der durch den Photostrom am Ableitwiderstand hervorgerufene Spannungsabfall wird durch ein Digital-Voltmeter* mit Elektrometereingang gemessen. Das Voltmeter besitzt einen Ausgang mit Ausgabe der Anzeige im binären Code und kann mit einem Fernschreiber zum Ausdrucken der Daten gekoppelt werden.

Erste Messungen mit der vorhandenen Anordnung zeigten, daß der Photomultiplier bereits bei geringer Intensität im nichtlinearen Bereich arbeitete. Außerdem war die Dynamik der Registrierung, d. h. das Verhältnis vom kleinsten zum größten meßbaren Signal zu klein: Das Digital-Voltmeter zeigt lediglich Werte von 0,0 bis 200,0 mV in vier Ziffern und Schritten

* Multimeter DATA Technology Modell 41 der Fa. DATA Technology München

von 0,1 mV an. Somit ergibt sich eine Dynamik von lediglich 2×10^3 . Mehrere Verbesserungen zur Empfindlichkeitsanpassung waren notwendig. Zuerst mußte jedoch geprüft werden, in welchem Bereich der Photomultiplier linear arbeitet.

3.3. Die Linearität des Photomultipliers

Das lineare Ansteigen der Meßgröße bei Steigerung der einfallenden Strahlung hängt neben der Betriebsspannung und der äußeren Beschaltung auch von der Art der Registrierung ab. Bei Impulszählung, bei der jede durch ein Photon ausgelöste Elektronenlawine (oberhalb einer einstellbaren Schwelle) als ein Ereignis gezählt wird, ist naturgemäß nur eine geringe Abhängigkeit von der Verstärkung, d. h. von der in einer Elektronenlawine vorhandenen Elektronenzahl, gegeben: Ein Einfluß ist nur bei den von der Amplitude her grenzwertig kleinen Impulsen zu erwarten, die bei einem Absinken der Verstärkung unter die Schwellenspannung absinken und somit nicht mehr registriert werden. Aus apparativen Gründen war eine Impulszählung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es wurde daher auf eine analoge Messung des auf die Auffangelektrode auffallenden Stroms bzw. der an einem Ableitwiderstand abfallenden Spannung zurückgegriffen. Bei dieser Art der Messung geht die Verstärkung eines jeden Impulses in das Meßergebnis ein.

3.4. Die Verstärkung des Photomultipliers

Die Verstärkung, definiert als pro ausgelöstes Photoelektron im Mittel auf die Auffanganode auffallende Elektronenzahl, hängt einmal ab von den physikalisch-geometrischen Daten des Photomultipliers: das Dynoden-

material beeinflußt die Zahl der ausgelösten Sekundärelektronen, mit der Zahl der Dynoden wächst die Zahl der "Verstärkerstufen", die geometrische Anordnung bestimmt die Form des elektrischen Feldes und damit die Güte der Verstärkerstufen. Die Größe des elektrischen Feldes ist wählbar über die am Photomultiplier anliegende Spannung U. Eine Abschätzung der Verstärkung V gibt die Näherungsformel

$$V = \text{Konstante} \times U^{\alpha n},$$

wobei n die Anzahl der Dynodenstufen und α eine vom Dynodenmaterial abhängige Zahl in der Größenordnung von 0,75 ist (siehe BRUINING (5)). Bei dem hier verwendeten Photomultiplier mit neun Dynodenstufen ($n = 9$) ergibt sich somit eine Abhängigkeit der Verstärkung von der Betriebsspannung bzw. vom elektrischen Feld mit der sechsten Potenz. Der Betrieb eines Photomultipliers setzt daher ein sehr gut stabilisiertes Hochspannungsnetzgerät voraus, verwendet wurde ein Hochspannungsgerät der Fa. KNOTT *.

3.5. Die optimale Betriebsspannung

Bei kleiner Betriebsspannung ist die Verstärkung niedrig. Vergrößert man die Spannung, steigt neben der Verstärkung eines UV-Signals auch der Dunkelstrom an, d. h. der bei Fehlen eines Signals meßbare Untergrundstrom. Gründe dafür sind Kriechströme, thermische Emission von Elektronen (Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms), Ionenrückkopplung und ionisierende Höhenstrahlung (MORTON (35)). Bei dem verwendeten Photomultiplier steigt der Dunkelstrom ab einer

* MSHM BN 600 der Fa. KNOTT Elektronik, Hohenschäftlarn

Betriebsspannung von 1150 V deutlich an, bei längerer Betriebsdauer mit Erwärmung des Multipliers liegt dieser Anstieg oberhalb 1050 V. Daher wurde eine Betriebsspannung von 1000 V gewählt und am Hochspannungsgerät fest eingestellt.

3.6. Die dynamische Verstärkung - der Spannungsteiler

Das elektrische Feld im Photomultiplier ändert sich während des Betriebs. Dazu trägt in geringem Maß die Raumladungswolke der Sekundärelektronen selbst bei; praktisch bedeutsamer ist die Aufladung der Dynoden durch das Austreten der Elektronen, wenn der "Nachschub" durch den Spannungsteiler zu gering ist (48). Der empfindlichste Nachweis einer Feldveränderung ist ein Abfall der Verstärkung der Einzelimpulse. Um abschätzen zu können, bei welchem Strom auf der Auffangelektrode dies eintritt, wurden die Impulse des Photomultipliers mit einem 15-MHz-Oszillographen analysiert: Bei der bisher verwendeten Schaltung mit Widerständen von je 12 Megohm zwischen den Dynoden tritt bereits bei 0,6 μ A Auffangstrom ein deutlicher Amplitudenabfall der Photomultiplier-Impulse auf. Als typische Meßströme traten in der bisherigen Anordnung Anodenströme von 4 μ A auf, sodaß der Photomultiplier im nichtlinearen Bereich arbeitete.

Bei 10 x 12 Megohm Widerstand, in Reihe geschaltet, fließen bei 1000 V 8,3 μ A Strom, der Verstärkungsabfall tritt bei 0,6 μ A Auffangstrom auf. Daraus ergibt sich, daß der im Spannungsteiler fließende Strom mehr als zehnmal größer als der maximal zur Messung zugelassene Auffangstrom sein muß.

Laut Datenblatt* ist für den Photomultiplier ein maximaler Strom von 100 μ A zugelassen, als maximaler

* Anhang 2

bei der Messung verwendeter Auffangstrom wurden $10\text{ }\mu\text{A}$ festgelegt. Wählt man 820 Kiloohm für einen Einzelwiderstand des Spannungsteilers, so fließt durch ihn ein Strom von $120\text{ }\mu\text{A}$ bei 100 V und die oben angegebene Bedingung ist erfüllt.

Eine weitere Verbesserung läßt sich erreichen, indem man den Widerstand zwischen der letzten Dynode und Masse durch eine Zenerdiode mit 100 V Zenerspannung ersetzt: Da die Zahl der von den einzelnen Dynodenplatten ausgelösten Elektronen von Dynodenplatte zu Dynodenplatte exponentiell wächst, werden von der letzten Dynode die meisten Elektronen losgelöst, eine Feldänderung wird sich also am Ausgang des Multipliers zuerst ausbilden. Die Zenerdiode sorgt nun durch ihr Regelverhalten dafür, daß unabhängig vom Elektronenstrom die Spannung an der letzten Dynode konstant bleibt.

Die Abb. 4 zeigt die endgültige Beschaltung des Photomultipliers. Mit Hilfe des schnellen Oszillographen konnte bis zum maximal verwendeten Auffangstrom von $10\text{ }\mu\text{A}$ keine Veränderung von Form und Größe der Photomultiplierimpulse gemessen werden. Die nachfolgend beschriebene Empfindlichkeitsregelung und die Dunkelstromkorrektur sowie der Glättungskondensator zur Verringerung der statistischen Meßunruhe sind mit dargestellt.

3.7. Möglichkeiten zur Änderung der Empfindlichkeit

Das Digitalvoltmeter und die daran angeschlossene Registriereinrichtung haben eine Dynamik von 2×10^3 . Dies genügt zur Messung eines Spektrums völlig, zur Anpassung an verschiedene Intensitäten ist jedoch ein größerer Bereich nötig. Eine Umstellung des Meß-

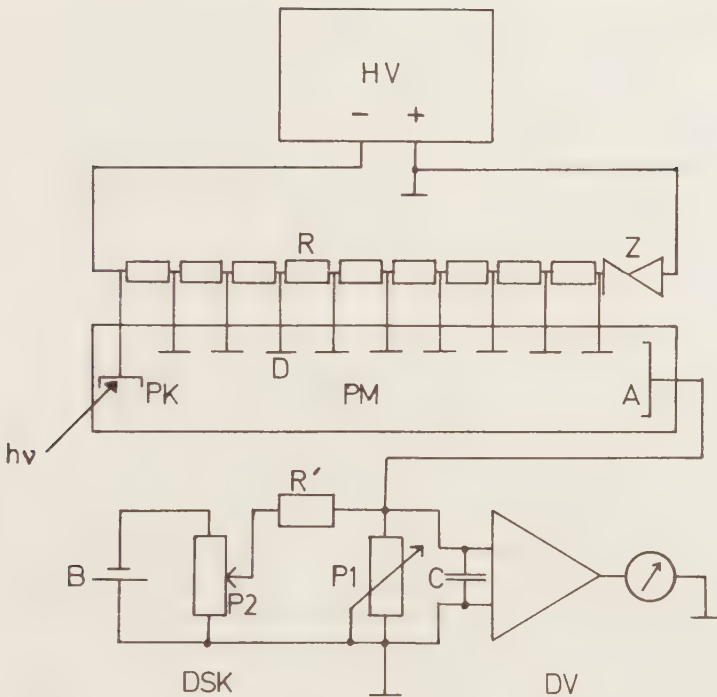


Abb. 4: Die Beschaltung des Photomultipliers

- R: Spannungsteiler mit neun Widerständen von je 820 kOhm
 Z: Zenerdiode (100 V)
 PM: Photomultiplier in schematischer Darstellung mit Photokathode PK, neun Dynodenplatten D und Auffangelektrode A
 HV: Hochspannungsnetzgerät
 P1: Ableitwiderstand (Potentiometer 250 kOhm)
 DV: Digitalvoltmeter mit Elektrometereingang
 C: Glättungskondensator (0,5 μ F)
 DSK: Dunkelstromkorrektur mit hochohmigem Widerstand R' (100 Megohm) und regelbarer Spannungsquelle, bestehend aus Batterie B und Potentiometer P2 (100 kOhm)

bereiches nach oben ist nicht erlaubt, da der Photomultiplier durch zu große Auffangströme überlastet und zudem im nichtlinearen Bereich arbeiten würde. Anhand des Schaltbildes läßt sich ableiten, daß an der Auffangelektrode intensitätsabhängige Spannungsschwankungen entsprechend der Anzeige am Meßinstrument auftreten, sodaß auch aus diesem Grund eine Erhöhung des Meßbereiches in den Volt-Bereich wegen des Einflusses auf die Linearität nicht möglich ist. Zu den Messungen wird daher ausschließlich die 200 mV-Einstellung verwendet.

Eine Veränderung der Spalt-Weite zur Intensitätsanpassung ist wegen des damit verbundenen Einflusses auf das Auflösungsvermögen nicht erlaubt.

Zwei Möglichkeiten der Empfindlichkeitsanpassung haben sich bewährt: Durch Auflegen einer Lochblende mit einem Innendurchmesser von etwa 5,5 mm auf die Eintrittsöffnung der Strahleinkopplung kann die in das Spektrometer eintretende Lichtmenge etwa auf ein Zwanzigstel reduziert werden, ohne die optischen Eigenschaften zu verändern.

Zum anderen wurde der feste Ableitwiderstand durch ein Potentiometer (Pl in Abb. 4) mit 250 Kiloohm Widerstand ersetzt. Mit Variation des Widerstandes ändert sich die am Multimeter angezeigte Spannung nach dem Ohmschen Gesetz linear (bei konstantem auf die Auffangelektroden auftreffenden Strom). Damit kann die Empfindlichkeit stufenlos angepaßt werden. Der eingestellte Widerstandswert wird durch Umschalten des Digitalvoltmeters auf Widerstandsmessung exakt gemessen, die Umrechnung der Intensitätswerte erfolgt durch einfache Quotientenbildung.

Als kleinster zulässiger Widerstand läßt sich bei einer Meßspannung von 200 mV und bei einem maximalen Strom an der Auffangelektrode von 10 μ A ein Wert von 20 Kiloohm errechnen. Damit ergibt sich ein kontinuierlicher Regelbereich von 1 : 12,5, zusammen mit dem durch die Lochblende erreichten Verhältnis von etwa 1 : 20 läßt sich die Empfindlichkeit im Verhältnis 1 : 250 variieren. Dieser Bereich mußte bei den Messungen fast voll ausgeschöpft werden.

3.8. Die Korrektur des Dunkelstroms

Bei maximaler Empfindlichkeit führt der prinzipiell nicht vermeidbare Dunkelstrom des Photomultipliers zu einer konstanten Anzeige bis zu 2 mV bereits ohne Intensität. Bei Integration kann sich ein absolut gesehen kleiner Fehlbetrag (kleiner als 1% Maximalanzeige) dennoch zu einer beträchtlichen Summe aufaddieren. Zwar könnte dieser Untergrundwert bei der Berechnung der Integrale mit Hilfe der Elektronischen Datenverarbeitung berücksichtigt werden, zweckmäßiger scheint, diesen Fehler vor der Registrierung zu kompensieren: Bei Strahlenquellen mit hohem Kontinuum-Anteil besteht nämlich bei nachträglicher Korrektur die Gefahr, daß das Kontinuum fälschlich mit subtrahiert wird. Zur Dunkelstromkorrektur wird der in der Größenordnung von einigen Nanoampere liegende Dunkelstrom durch einen ebenso großen Kompensationsstrom umgekehrter Polarität aus einer hochohmigen Stromquelle kompensiert, die Einstellung erfolgt am Potentiometer der Dunkelstromkorrektur (P2 in Abb. 4).

4. Die Verstellung der Wellenlänge

Der Antrieb zur Verstellung der Wellenlänge mußte völlig neu entwickelt werden. Dies war nötig, um einen weitgehend automatischen und vor allem reproduzierbaren Wellenlängenvortrieb zu erreichen. Als Antriebsmotor wurde ein Schrittmotor gewählt, der von einer Steuereinheit angesteuert wird und über ein Wechselgetriebe die Wellenlänge des Spektrometers verstellt.

4.1. Die Arbeitsweise eines Schrittmotors

Das Charakteristikum des Schrittmotors ist das schrittweise Drehen der Motorwelle, eine kontinuierliche Bewegung ist nicht möglich, sie wird ersetzt durch eine rasch durchlaufene Folge von Einzelschritten. Wegen der schrittweisen Funktion ist der Schrittmotor ideal geeignet zur Kombination mit digitaler Datenverarbeitung.

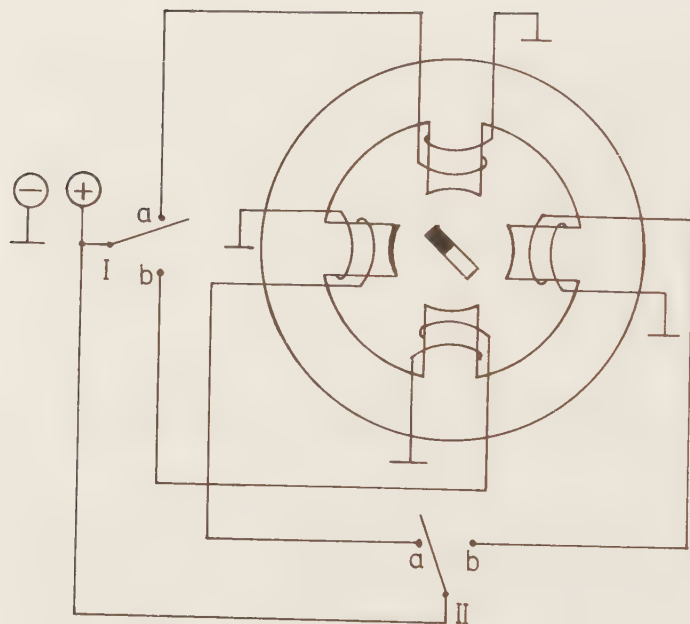
Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Motor mit einem permanentmagnetischen Rotor verwendet. Dabei bewegt sich ein Rotor, der aus einem permanentmagnetischen Material höchster Koerzitivkraft gefertigt ist und der an seiner Oberfläche, durch feine Nuten getrennt, wechselnde magnetische Polarität zeigt, in einem Statorgehäuse, dessen magnetische Polschuhe ebenfalls genutet sind. Vier getrennte Magnetspulen sind im Statorgehäuse gewickelt, sie erzeugen im Inneren des Motors ein magnetisches Feld. Der Rotor stellt sich in eine Position mit minimalem magnetischen Streufluß ein. Durch geeignete Anordnung der magnetischen Pole auf dem Rotor und korrespondierende Anordnung und Nutung der Polschuhe im Stator entsteht eine Rasterung der stabilen Lagen. Beispielsweise hat der

verwendete Schrittmotor bei konstantem elektrischen Feld zwölf stabile Lagen pro Umdrehung. Lassen sich durch Umpolen einer oder mehrerer Spulen mehr als drei verschiedene Rasterungen erzeugen, so läßt sich durch elektrisches Umschalten genau ein Schritt der Rotorachse in definierter Richtung und mit einem bestimmten Winkel ausführen. Die Abb. 5 zeigt schematisch einen Schrittmotor mit 90° -Schritten. Vom Strom durchflossene Spulen erzeugen am zugehörigen Polschuh einen Südpol, jeweils zwei von ihnen sind eingeschaltet. Der Schaltrhythmus und die entsprechende Einstellung des magnetischen Rotors sind dargestellt.

4.2. Vorteile eines Schrittmotors

Anhand der prinzipiellen Schaltung lassen sich auch die besonderen Eigenschaften eines Schrittmotors erkennen: Der Schrittmotor schaltet einen Schritt weiter durch Schalten von Stromkreisen, er ist damit ein idealer elektromagnetischer Wandler als Zwischenglied zwischen einer digitalen elektronischen Datenverarbeitung und einem mechanischen Gerät; er arbeitet praktisch ohne verschleißanfällige mechanische Bauteile.

Durch die elektromechanische Arbeitsweise ergibt sich eine hohe Genauigkeit bei der Einhaltung des Schrittwinkels. Die Winkeleinstellung ist durch den mechanisch-geometrischen Aufbau des Schrittmotors vorgegeben und unabhängig von elektrischen Parametern. Die Winkelgenauigkeit ist nach einem Schritt genauso groß wie nach 1000, d. h. es ergibt sich kein additiver Fehler. Infolge des hohen Haltemoments wirkt ein Schrittmotor gleichzeitig als Antrieb und als Bremse, sodaß sich mechanische Bremsen, Rasten etc. erübrigen. Ein Ruhedrehmoment führt nur zu einer



		1	2	3	4	5=1
I	a	+	+		+	+
	b			+	+	
II	a	+			+	+
	b		+	+		
		↙	↗	↘	↖	↗

Abb. 5: Schema eines Schrittmotors

Jeweils zwei der vier Spulen sind vom Strom durchflossen und erzeugen am zugehörigen Pol einen Südpol, der magnetische Rotor stellt sich mit seinem (schwarz dargestellten) Nordpol entsprechend ein. Durch Umlegen eines der beiden Schalter wird der Rotor jeweils um einen Schritt weitergedreht. In der dargestellten Wertetabelle wird jeder Schalterstellung die zugehörige Rotorstellung zugeordnet, nach vier Schritten ist die Ausgangsstellung erreicht.

kleinen, drehmomentabhängigen und reversiblen Winkeländerung, die wiederum nicht additiv und somit meist vernachlässigbar ist.

4.3. Die Dimensionierung und Ausführung der Schrittmotor-Getriebe-Einheit

Das zum Verstellen der Wellenlängenskala des Spektrometers nötige Drehmoment wurde mit einer Federwaage bestimmt, es liegt unter 2 Ncm. Zur Erzeugung dieses Drehmomentes würde ein kleiner Schrittmotor genügen, wegen der geringen Preisdifferenz wurde jedoch ein drehmomentstärkerer Motor gewählt, um den Motor eventuell anderweitig mitverwenden zu können. Der verwendete Motor* hat ein maximales Drehmoment von 11 Ncm und einen Schrittwinkel von $7,5^\circ$ entsprechend 48 Schritten pro Umdrehung.

Durch ein nachgeschaltetes Getriebe kann der pro Schritt durchgeführte Wellenlängenvorschub den Meßaufgaben angepaßt werden: Im "Schnellgang" werden orientierende Messungen an großen Wellenlängenbereichen durchgeführt. Die mittlere Geschwindigkeit wird für normale Messungen an Spektren verwendet. Eine starke Untersetzung erlaubt, einzelne Spektralbereiche oder Linienpaare mit hoher Auflösung zu untersuchen.

Das Getriebegehäuse ist aus stabilen Aluminiumwinkelprofilen gefertigt. Der Schrittmotor ist direkt am Getriebegehäuse befestigt, die Schrittmotorwelle ist verlängert und trägt die drei Antriebszahnräder. Auf der Abtrieb-Welle sind die drei Abtriebzahnräder in

*RDM 63/12 der Fa. Berger GmbH, Lahr

Längsrichtung mit Hilfe einer Schaltmuffe verschiebbar, der Schalthebel rastet bei den drei Gängen ein. Eine kraftschlüssige Verbindung wird über Nut und Feder unabhängig von der Verschiebung hergestellt. Die Abtriebsachse ist nach unten herausgeführt und treibt über einen Mitnehmer, der in eine schlitzförmige Ausfräsung eines Hebels eingreift, die Wellenlängenverstellachse an, ohne Scherkräfte etc. auf das Spektrometer zu übertragen. Die Abb. 6 zeigt die Schrittmotor-Getriebe-Einheit am Spektrometer.

Das Getriebegehäuse ist am Spektrometer über eine Dreipunkt-Zapfenlagerung angeflanscht und kann durch Lösen von drei Klemmschrauben abgenommen werden. Dadurch kann die Schrittmotor-Getriebe-Einheit leicht an mehreren Apparaturen verwendet werden.

Die Getriebeabstufung wurde so gewählt, daß sich ein UV-Spektrum auf dem für eine Messung zur Verfügung stehenden Speicherplatz von 200 Meßpunkten, aufgezeichnet bei mittlerer Geschwindigkeit, abbilden läßt. Die Untersetzung beträgt im ersten Gang $20 : 150$ Zähne, entsprechend 0,133; die mittlere Geschwindigkeit hat eine Untersetzung von $50 : 120$ entsprechend 0,417 und der Schnellgang $80 : 90$ entsprechend 0,889.

4.4. Die elektronische Steuerung des Schrittmotors

Die Abb. 7 zeigt die elektronische Steuerung des Schrittmotors im Blockschaltbild. Die einzelnen Schaltschritte werden durch eine Steuerkarte ausgeführt. Ein Interface stellt das Bindeglied zur Steuereinheit der übrigen Apparatur dar und gewährleistet zeitgerechtes Weiterschalten. Die Stromver-

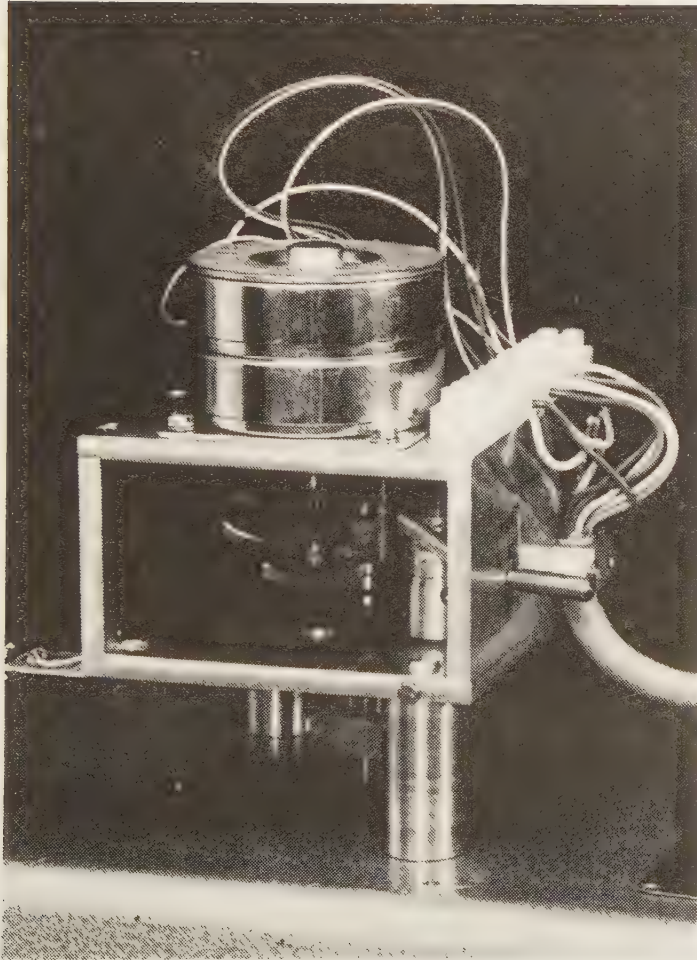


Abb. 6: Ansicht der Schrittmotorgetriebeeinheit

Der zylindrische Schrittmotor (oben) ist direkt am Getriebegehäuse angeflanscht. Durch den rechts aus dem Getriebegehäuse herausragenden Schalthebel werden die drei Getriebeabstufungen gewählt. Unten sind die zylindrischen Säulen der Dreipunkthalterung erkennbar.

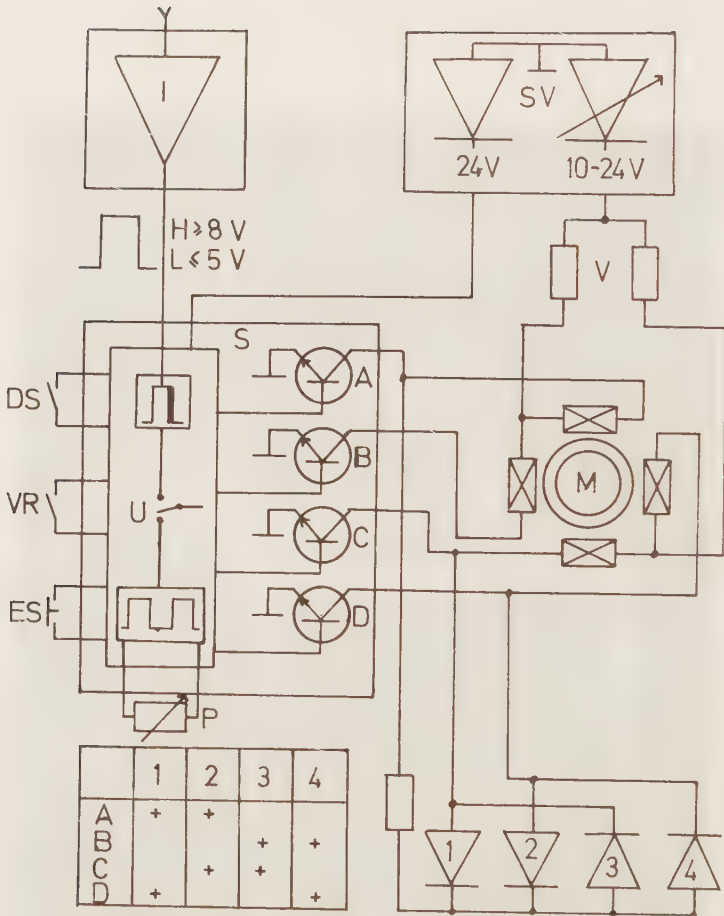


Abb. 7: Schema der Schrittmotorsteuerung

- M: Schrittmotor mit 4 Spulen und Vorwiderstand V (25 Ohm)
 S: Steuerschaltung mit 4 Leistungstransistoren A - D, externe Schalter für Dauerbetrieb (DS), Vorwärts-Rückwärts (VR), Einzelschritt (ES) und Umschaltung (U) zwischen externem und internem Taktgeber (interne Taktfrequenz mit Potentiometer P (250 kOhm) einstellbar)
 SV: Stromversorgungseinheit (Abb. 8)
 I: Interface (Abb. 9) zur Anpassung an High-Level-Logik (HLL)

Unten Schrittzanzeige, bestehend aus einer Matrixschaltung von 4 Leuchtdioden und entsprechendem Vorwiderstand sowie Tabelle mit Zuordnung der Schaltzustände der Leistungstransistoren zur Schrittzahl

sorgung stellt die Versorgungsspannung her, wobei der Leistungsstromteil regelbar ausgeführt wurde. Eine kleine Anzeige-Einheit zeigt den jeweiligen Schaltmodus an.

4.4.1. Die Ansteuerung des Schrittmotors

Die Steuerschaltung* wurde zusammen mit dem Schrittmotor gekauft. Sie wird mit Gleichspannung betrieben und arbeitet in der HL-Logik (high-level). Die entsprechenden Logikspannungen und die den einzelnen Schritten zugehörigen Schaltzustände der vier Leistungstransistoren sind in Abb. 7 dargestellt. Durch einen negativen Flankenimpuls am Steuereingang dreht der Motor einen Schritt in der eingestellten Richtung weiter. Dauerlauf kann durch einen internen Taktgeber, dessen Frequenz durch ein externes Potentiometer variierbar ist, mit unterschiedlicher Geschwindigkeit gewählt werden. Eine Einzelschrittschaltung ist vorhanden. Die externe Beschaltung wurde neu entwickelt und so den speziellen Erfordernissen der Meßapparatur angepaßt:

Die Spannung der Steuerschaltung beträgt konstant 24 V, die Motorspannung wurde jedoch regelbar ausgelegt. Dadurch kann die Leistung des Motors und damit die Wärmeentwicklung reduziert und den Erfordernissen angepaßt werden. Wichtiger ist jedoch, daß durch Reduzierung des Drehmoments die ruckweise Bewegung des Motors etwas gemindert und ein "weicherer" Motorlauf mit geringerer Erschütterung der Apparatur ermöglicht wird.

* D 059 der Fa. Berger GmbH Lahr

Die Spulenwicklungen des Schrittmotors besitzen eine hohe Induktivität bei relativ niedrigem Spulenwiderstand. Beim Anlegen einer Spannung an die Spulen wird dadurch eine hohe induktive Gegenspannung erzeugt, so daß der Strom und damit das magnetische Feld nur relativ langsam ansteigen können. Durch einen Ohmschen Vorwiderstand V von 25 Ohm in jeder Spulenwicklung wird die Zeitkonstante L/R , entsprechend dem Verhältnis von Induktivität zu Ohmschem Gesamtwiderstand des Spulenkreises, etwa auf ein Fünftel reduziert. Damit kommt es zu einem rascheren Aufbau des magnetischen Feldes, dies ist für einen zuverlässigen Betrieb ohne Überspringen von Schritten bei niedriger Betriebsspannung oder hoher Schrittgeschwindigkeit erforderlich.

Eine Schrittanzeige dient zur Festlegung des jeweiligen Schaltzustandes des Motors. Sie wird aus einer Matrixschaltung mit vier Leuchtdioden gebildet. Durch die in Abb. 7 dargestellte Schaltanordnung wird erreicht, daß jeweils nur eine Leuchtdiode entsprechend Schritt eins bis vier leuchtet. Die Schrittanzeige ermöglicht zusammen mit der Wellenlängenskala die Einstellung einer reproduzierbaren Startposition bei Messungen der Spektralverteilung.

4.4.2. Die Stromversorgungseinheit

Der Schrittmotor benötigt zum Betrieb der Steuerungselektronik eine Betriebsspannung von 24 V bei kleinen Betriebsströmen, die Spulenwindungen werden aus den oben genannten Gründen mit einer regelbaren Spannung versorgt, der maximale Strom liegt bei 2,5 A. Die Abb. 8 zeigt die elektronische Schaltung: Ein Transformator, der über eine Sicherung an Netzspannung betrieben wird, liefert von der Netzsspannung entkoppelte

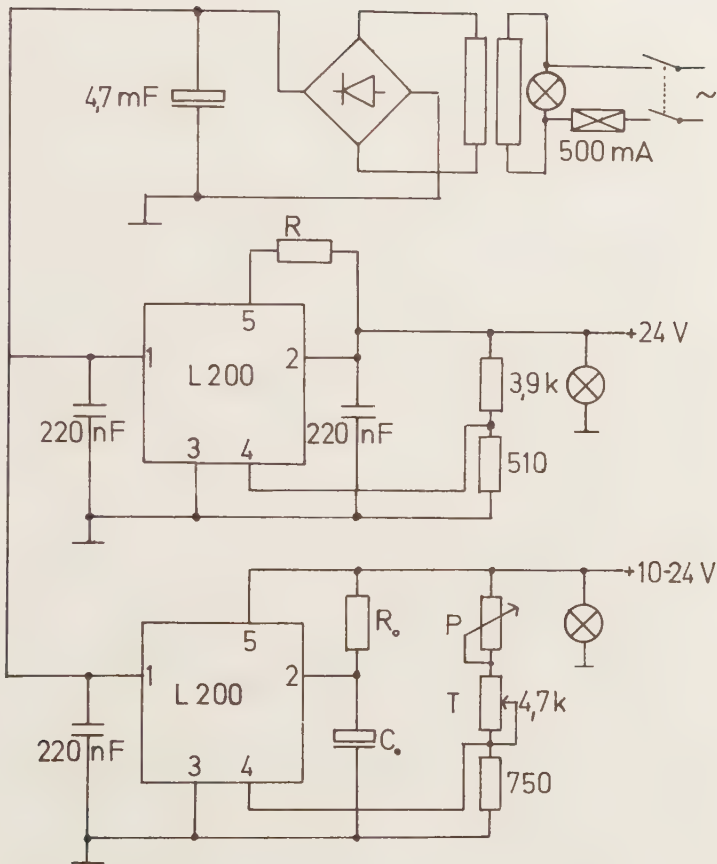


Abb. 8: Die Stromversorgungseinheit

Oben: Transformator mit Gleichrichter in Graetz-Schaltung und Speicherkondensator

Mitte: Festspannungsregler 24 V mit Strombegrenzung auf ca. 200 mA über R (2 Ohm)

Unten: Spannungsregler mit am Potentiometer P (4,7 kOhm) regelbarer Ausgangsspannung, die maximal erreichbare Spannung wird am Trimmer T eingestellt. Einschaltverzögerung über RoCo (1 kOhm, 100 µF)

Der verwendete L 200 ist ein positiver 5-pin-Spannungsregler in einem "Pentawatt"-Gehäuse. Die Pin-Anschlüsse bedeuten: 1 Eingang, 2 Begrenzung, 3 Masse, 4 Referenz (2,8 V), 5 Ausgang.

und heruntertransformierte Wechselspannung, die von einem Gleichrichter in Graetz-Schaltung gleichgerichtet und durch einen Kondensator geglättet wird. Zur Regelung der beiden Spannungen werden programmierbare Leistungsregler* verwendet, die im Vergleich zu üblichen Festspannungsreglern zusätzliche Anschlüsse zur Spannungs- und Stromprogrammierung enthalten. Durch externe Beschaltung lassen sich beliebige Spannungswerte und Stromstärken einstellen.

Ein Spannungsregler erzeugt die Betriebsspannung von 24 V, durch einen Schutzwiderstand R (2 Ohm) wird eine Strombegrenzung auf 200 mA eingestellt; dies dient zum Schutz der Steuerelektronik bei Störungen beliebiger Art. Kondensatoren verbessern das Impulsverhalten.

Der andere Spannungsregler erzeugt die variable Betriebsspannung für die Motorspulen: Die Spannung wird über einen regelbaren Spannungsteiler (Potentiometer P) eingestellt. Über ein RC-Glied R_0C_0 wird erreicht, daß die Ausgangsspannung nach dem Einschalten des Netzgerätes nur langsam ansteigt. Diese Einschaltverzögerung von etwa einer Sekunde verhindert, daß kurz nach dem Einschalten zu große Spitzenströme durch den Gleichrichter fließen.

Der Gleichrichter und die beiden Spannungsregler sind auf einem gemeinsamen Kühlblech montiert, bei Übertemperatur einer der Bauteile wird die Stromversorgungseinheit abgeschaltet.

* L 200 der Fa. SGS-ATES, Grafing

4.4.3. Das Interface

Die Steuerschaltung benötigt, wie oben erwähnt, einen negativen Flankenimpuls als Steuersignal, um einen Schritt weiterzuschalten. Als Bindeglied zwischen der Steuerschaltung und einer externen Steuerung dient das Interface, es wandelt die externen Signale in Impulse geeigneter Größe und Polarität um. Die Abb. 9 zeigt die verwendete Schaltung mit zwei Operationsverstärkern*. Der erste Operationsverstärker arbeitet in Elektrometerschaltung, um möglichst wenig Einfluß auf die Signalquelle zu nehmen. Zwei Dioden schützen den Eingang vor Spannungsspitzen. Über ein Potentiometer T1 wird die Verstärkung stufenlos geregelt, ein zweites Potentiometer T2 gestattet die stufenlose Verschiebung des Nullpunktes. Ein bezüglich der halben Betriebsspannung invertierender zweiter Operationsverstärker ist nachgeschaltet. Insgesamt können damit beliebige Eingangsimpulse derart umgewandelt werden, daß der in der Steuerschaltung vorhandene Trigger zuverlässig angesteuert werden kann.

Das Interface ist auf einer eigenen Platine aufgebaut, die noch genügend Platz für Ergänzungsschaltungen bietet.

Die Stromversorgungseinheit, die Platinen für Steuerschaltung und Interface und die zugehörigen Bedienungselemente sind in einem gemeinsamen Chassis untergebracht und über ein sechsadriges Kabel mit dem Schrittmotor verbunden. Die aufwendige Interfaceschaltung und die rasch wechselbare Schrittmotor-

* μ A 741 TEXAS Instruments

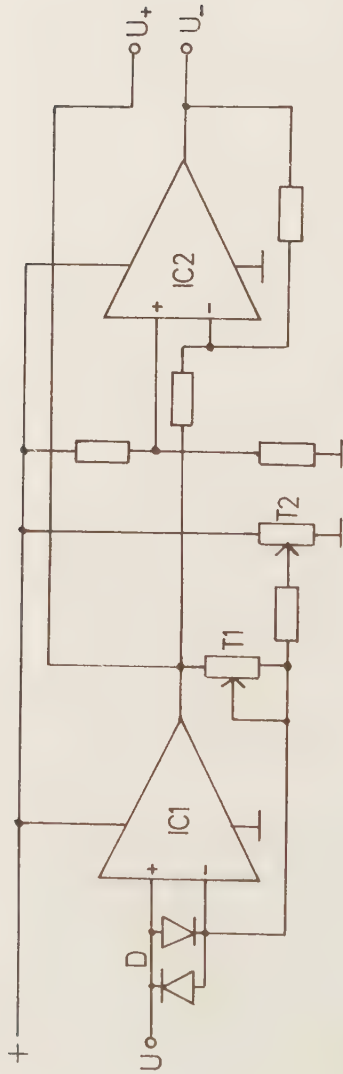


Abb. 9: Das Interface

Die Eingangsspannung U wird durch den Operationsverstärker IC1 mit einstellbarer Verstärkung verstärkt, wobei der Nullpunkt der Verstärkung beliebig gewählt werden kann, man erhält die Spannung U_+ . Der Kreis mit dem Operationsverstärker IC2 invertiert U_+ bezüglich der halben Betriebsspannung zu U_- , beide Spannungen stehen an getrennten Ausgängen parallel zur Verfügung.

T1: Trimmer (500 k Ω m) zur Einstellung der Verstärkung

T2: Trimmer (10 k Ω m) zur Verschiebung des Nullpunktes der Verstärkung, z.B. bei gleichspannungsüberlagertem Signal

D: Schutzdioden am Eingang des ersten Verstärkers

IC: Operationsverstärker μ A 741

Alle nicht bezeichneten Widerstände haben den Wert 18 k Ω m

Getriebe-Einheit ermöglichen einen universellen Einsatz an mehreren Apparaturen. Die Abb. 10 zeigt die Schrittmotor-Getriebe-Einheit am Spektrometer montiert, im Vordergrund ist die Steuereinheit abgebildet.

5. Die Arbeitsweise der gesamten Anlage

Die Abb. 11 zeigt eine Gesamtansicht der Anlage. Die ultraviolette Strahlung der zu messenden Strahlenquelle wird über die Strahleinkopplung dem Spektrometer zugeführt. Die Wellenlänge wird mit Hilfe des Schrittmotors variiert, die oben beschriebene Schrittmotorsteuerung übernimmt die schrittweise Weiter-schaltung. Die Strahlung der eingestellten Wellenlänge wird durch den Photomultiplier registriert, die Registrierempfindlichkeit wird entsprechend der Intensität der zu untersuchenden Strahlenquelle eingestellt. Die am Ableitwiderstand abfallende Spannung wird von einem Digitalvoltmeter gemessen, durch eine im Meßgerät eingebaute Codiervorrichtung steht das Meßergebnis im binären Code (BCD) zur Verfügung.

Um die codiert vorliegenden Meßergebnisse speichern zu können, wurde ein am Institut für medizinische Balneologie vorhandener digitaler Datenkoppler* und der zugehörige Fernschreiber** verwendet: Der Datenkoppler übernimmt die Umkodierung in den vom Fernschreiber benötigten 5-Kanal-Fernschreibcode, die zeitgerechte Ausgabe an den Fernschreiber und die Formatierung, d. h. die Daten werden mit Vorzeichen,

* Digitaler Datenkoppler L 70/ZE der Fa. FEY, München

** 5-Kanal-Fernschreiber der Fa. SIEMENS, München

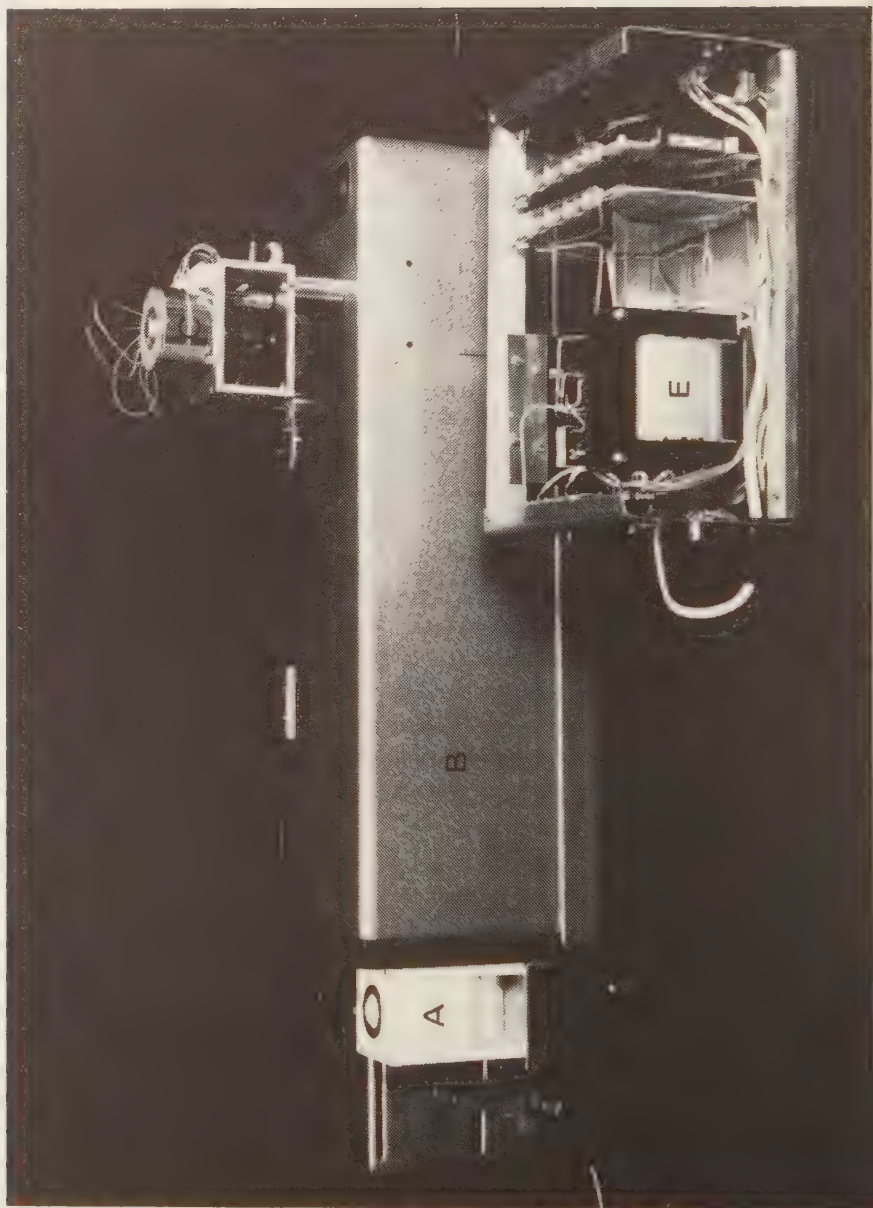


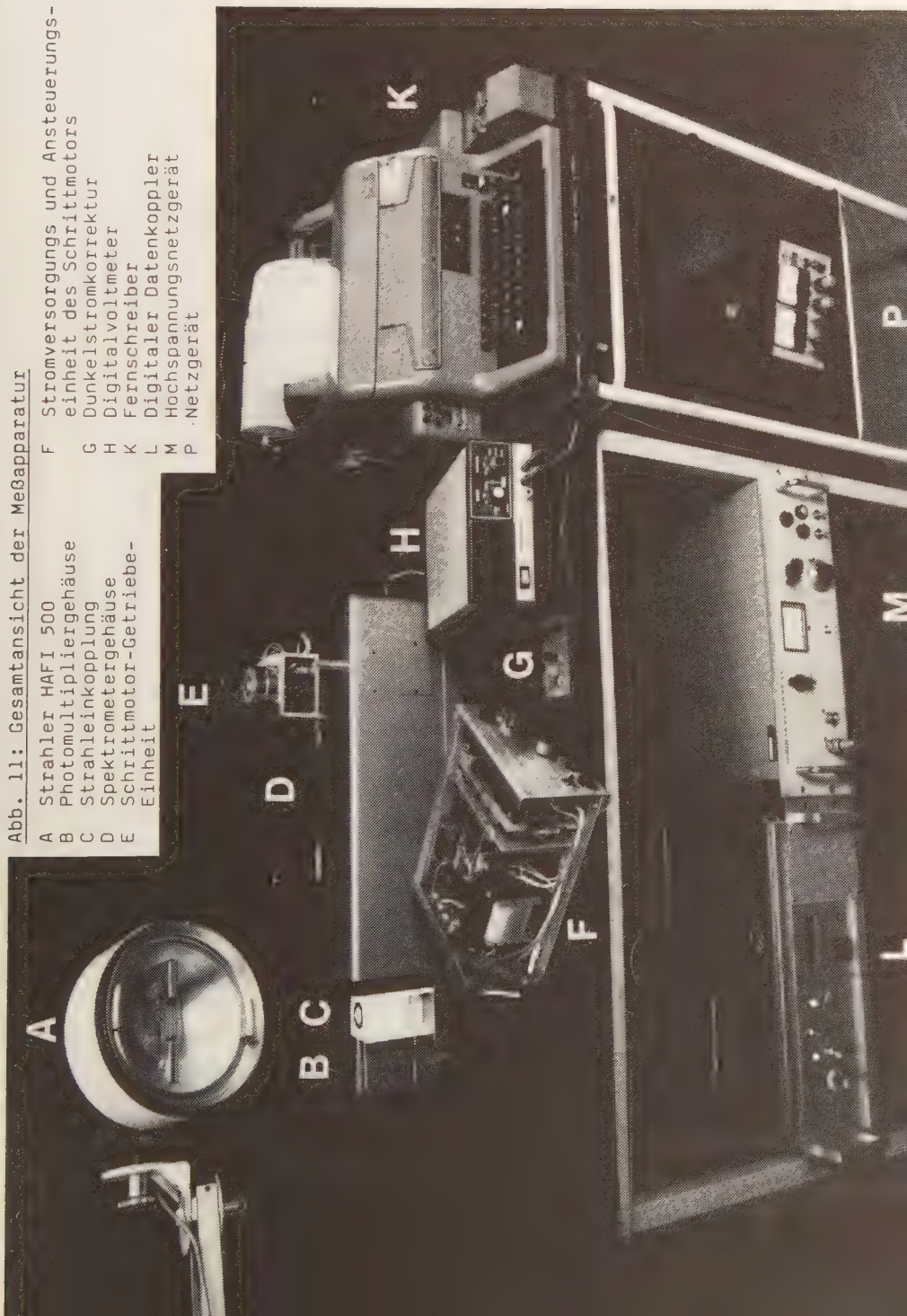
Abb. 10: Ansicht des Spektrometers

- | | |
|--|--------------------------------|
| A: Strahleinkopplung | B: Spektrometergehäuse |
| C: Schrittmotorgetriebeeinheit
mit Schrittanzeige | D: Photomultiplier-
gehäuse |
| E: Stromversorgungs- und Ansteuerungseinheit des Schrittmotors | |

Abb. 11: Gesamtansicht der Meßapparatur

A Strahler HAFI 500
 B Photomultipliergehäuse
 C Strahleinkopplung
 D Spektrometergehäuse
 E Schrittmotor-Getriebe-Einheit

F Stromversorgungs und Ansteuerungseinheit des Schrittmotors
 G Dunkelstromkorrektur
 H Digitalvoltmeter
 K Fernschreiber
 L Digitaler Datenkoppler
 M Hochspannungsnetzgerät
 P Netzgerät



Satzzeichen, Zwischenraum und in der richtigen Zeilenanordnung auf dem Lochstreifen festgehalten. Eine zusätzliche, vom Digitalvoltmeter nicht angezeigte, aber gemessene Stelle wird mit ausgedruckt, sodaß sich fünf Ziffern ergeben.

Der zeitliche Ablauf ist folgendermaßen organisiert: Das Digitalvoltmeter liefert am Ende einer Messung ein Signal, das über das Interface der Schrittmotorsteuerung den Schrittmotor einen Schritt weitersteuert. Dasselbe Signal veranlasst den Datenkoppler, den gespeicherten Meßwert abzurufen und auf dem Lochstreifen festzuhalten. Während der Datenübernahme und des Stanzens des Lochstreifens ist das Meßgerät durch ein Signal des Datenkopplers blockiert, nach dem Ende des Lochstreifenstanzens beginnt durch Aufheben der Blockierung ein neuer Meßzyklus. Diese Art der wechselseitigen Blockierung von Meßgerät und Datenkoppler ermöglicht kürzeste Meßzeiten bei größtmöglicher Sicherheit. Der Schrittmotor wird dabei jeweils während der Datenübernahme gesteuert, mechanische Erschütterungen oder elektrische Störimpulse sind bis zum Beginn der nächstfolgenden Messung abgeklungen.

Die Meßgeschwindigkeit wird im wesentlichen durch den Fernschreiber bestimmt, die Meßzeit des Digitalvoltmeters beträgt lediglich 300 msec, die Umschaltvorgänge benötigen nur einige Millisekunden.

6. Bedienung und Einstellwerte der Apparatur

Im folgenden werden die wichtigsten Schritte zur Inbetriebnahme der Apparatur beschrieben. Grundsätzlich wurde eine Vorlaufzeit von 15 min eingehalten, um der

Registrierelektronik genügend Zeit zur Erreichung eines Gleichgewichtszustandes zu geben. Die Hochspannung für den Photomultiplier war konstant auf 1000 V eingestellt, sie wurde nicht verändert, bei Messungen an verschiedenen Tagen erwies sich die Spannung als stabil.

Fast alle Messungen wurden bei der mittleren Geschwindigkeit durchgeführt. Der Start liegt immer bei der Wellenlänge 240,0 nm, die Wellenlängenskala und die Schrittanzeige des Schrittmotors gestatten eine reproduzierbare Einstellung.

Die Spaltweite des Spektrometers beeinflusst Intensität und Auflösungsvermögen. Die Spaltweite darf nicht zu gering gewählt werden: Ist die spektrale Halbwertsbreite des Spektrometers kleiner als die Schrittweite, so würde eine schmale Linie, die zwischen zwei Wellenlängenschritten liegt, fast nicht registriert, ein relevanter Fehler bei der Wellenlängenintegration wäre die Folge. Für Messungen wurde daher die Spaltbreite 0,5 mm gewählt, das ergibt nach dem Datenblatt des Spektrometers bei 300 nm eine spektrale Halbwertsbreite von etwa 1,8 nm, die Schrittweite beträgt dabei mit mittlerer Geschwindigkeit etwa 1 nm. Die gemessene Linienbreite wird durch die spektrale Halbwertsbreite nach unten begrenzt, die Feinstruktur einer Linie spielt jedoch bei den beabsichtigten Intensitätsmessungen keine Rolle.

Die Empfindlichkeitseinstellung wird bei der maximalen Intensität im zu untersuchenden Wellenlängenbereich durchgeführt. Bei Quecksilberdampfstrahlern sind die Linien 313 nm und 366 nm die stärksten UV-Linien. Entsprechend wurde bei Messungen des ge-

samen UV-Bereiches auf 366 nm, bei Messungen nur des erythemwirksamen Bereiches auf 313 nm zur Empfindlichkeitseinstellung eingestellt. Mit Hilfe der Lochblende an der Strahleinkopplung und durch Variation des Ableitwiderstandes wird die Intensität auf submaximale Werte eingestellt (etwa 190,0 mV am Digitalvoltmeter). Durch Umschalten des Digitalvoltmeters auf Ohm-Messung wird sodann der gewählte Ableitwiderstand gemessen. Gewählte Blende und Ableitwiderstand werden notiert.

Bei geschlossenem Lichtweg wird jetzt mit Hilfe der Dunkelstromkorrektur die Anzeige auf 0,0 eingestellt.

Am digitalen Datenkoppler wird eingestellt, daß nach jeweils neun Messungen eine neue Zeile des Fernschreibausdruckes begonnen werden soll (Schreibbreite). Am Fernschreiber wird vor Beginn der Messung ein Lochstreifen-Vorspann mit ca. 25 Zeilenumschaltungen gestanzt.

Die Messung wird gestartet durch Starten des Datenkopplers: Damit wird der erste Meßwert ausgedruckt, durch die wechselseitige Beeinflussung von Digitalvoltmeter und Datenkoppler und die phasenrichtige Ankopplung des Schrittmotors läuft die Messung automatisch weiter. Die Messung wird beendet durch Stoppen des Datenkopplers. Ein Nachspann von ca. 25 Buchstabenumschaltungen markiert das Ende des Lochstreifens.

IV. Eichung und Qualitätsüberprüfung der Apparatur

1. Die Zuordnung Wellenlänge-Schrittzahl

1.1. Die Wellenlängeneichung

Das verwendete Spektrometer hat eine geeichte Wellenlängenskala. Die Eichung wurde im verwendeten Bereich überprüft und durch Schwenken des Kollimatorspiegels nachjustiert. Wie oben erwähnt, konnte eine Wellenlängengenauigkeit von 0,15 nm im Bereich 200 - 400 nm erreicht werden.

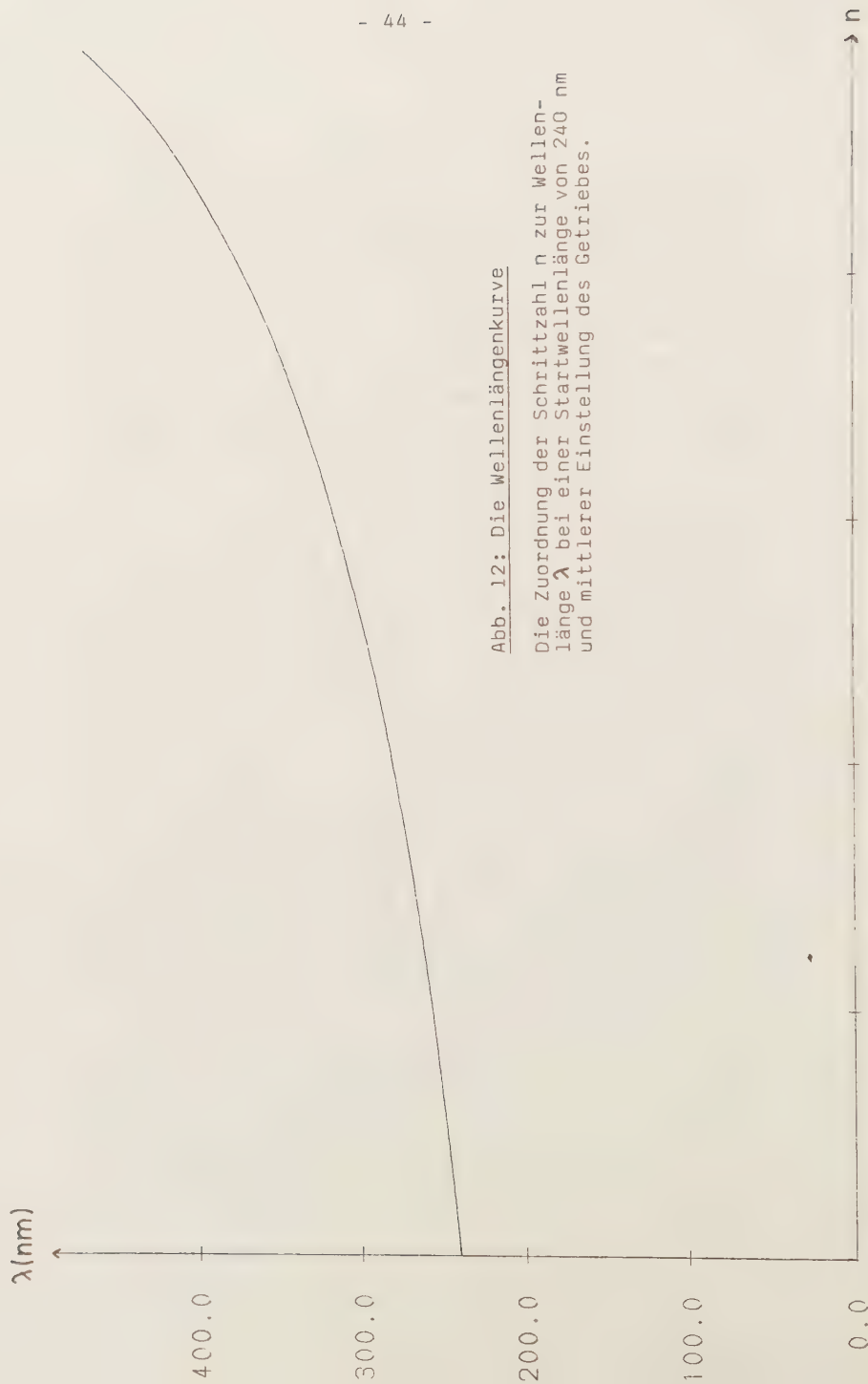
Um die gewonnenen Daten mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung weiterverarbeiten zu können, ist es nötig, daß jedem Meßwert der zugehörige Wellenlängenswert zugeordnet ist. Da der zur Wellenlängenverstellung verwendete Schrittmotor keinen additiven Fehler aufweist, ist eine eindeutige Zuordnung zwischen Wellenlänge und Schrittzahl bei bekannter Startwellenlänge gegeben.

Zur Ermittlung dieser Zuordnung wurde, ausgehend von einer Startwellenlänge von 240,0 nm, die Wellenlänge jeweils alle zehn Schritte bei mittlerer Getriebeeinstellung festgestellt. Mit Hilfe der Datenverarbeitung wurde eine nichtlineare Interpolationskurve gebildet ("Wellenlängenkurve", Abb. 12).

Wird eine andere Einstellung des Getriebes verwendet, muß lediglich der Abszissenmaßstab im Verhältnis der Getriebeabstufung linear geändert werden. Bei anderer Startwellenlänge wird der Nullpunkt verschoben. Damit ist eine eindeutige Zuordnung der Wellenlänge zur Schrittzahl für alle Getriebeeinstellungen und Startwellenlängen gegeben.

Abb. 12: Die Wellenlängenkurve

Die Zuordnung der Schrittzahl n zur Wellenlänge λ bei einer Startwellenlänge von 240 nm und mittlerer Einstellung des Getriebes.



1.2. Diskussion der Wellenlängenkurve

Die Wellenlängenkurve hat einen deutlich nichtlinearen Verlauf: Bei kurzen Wellenlängen entspricht ein Schritt nur einer kleinen Wellenlängendifferenz, bei großen Wellenlängen wird dagegen die Wellenlänge jeweils um einen großen Betrag geändert. Die Nichtlinearität liegt begründet in der nichtlinearen Dispersion des verwendeten Quarzprismas.

Einige Folgerungen seien kurz erwähnt: Die nichtlineare Dispersion hat zur Folge, daß das Auflösungsvermögen des Spektrometers sich mit der Wellenlänge ändert. Die spektrale Halbwertsbreite steht dabei für alle Wellenlängen in einem konstanten Verhältnis zur Wellenlängenveränderung, die bei einem Schritt vollzogen wird. Damit ist eine für eine bestimmte Wellenlänge in Relation zur Schrittweite gewählte Spaltbreite bzw. spektrale Halbwertsbreite für alle Wellenlängen gleich günstig.

Wegen der konstanten Relation von spektraler Halbwertsbreite zur Wellenlängenschrittweite werden alle Spektrallinien in der Darstellung über der Schrittzahl gleich breit dargestellt (Abb. 15); denn die gemessene Breite einer Spektrallinie ist bestimmt durch die spektrale Halbwertsbreite (solange diese größer als die physikalische Linienbreite ist) - und die spektrale Halbwertsbreite ist, ausgedrückt in Schrittweiten, für alle Wellenlängen gleich. Umgekehrt nimmt die spektrale Halbwertsbreite, ausgedrückt im Wellenlängenmaßstab, mit steigender Wellenlänge zu, sodaß die Linien mit steigender Wellenlänge breiter abgebildet werden, wenn der Ordinatenmaßstab die Wellenlänge ist. Dies ist an den im zweiten Abschnitt der Arbeit abgebildeten Meßkurven deutlich zu sehen. Es macht nochmals deutlich

daß bei der gewählten Spaltbreite die gemessene Linienform im wesentlichen durch das Spektrometer bestimmt wird und nicht die Feinstruktur einer Linie widerspiegelt. Es sei erwähnt, daß auf eine schmale spektrale Bandbreite mit besserer Darstellung der Feinstruktur zugunsten einer intensitätsgerechten Abbildung verzichtet wurde.

2. Die Intensitätseichung

2.1. Grundsätzliches zur Eichung

Die Eichung eines Spektrometers umfaßt zwei Vorgänge: Einmal müssen die wellenlängenabhängigen Empfindlichkeitsschwankungen erfaßt werden, ein solchermaßen geeichtes Gerät genügt zur Festlegung der relativen Intensität von verschiedenen Strahlquellen. Bestimmt man zusätzlich für eine Wellenlänge den Absolutwert der Intensität, so kann man Intensitätsmessungen in Absolutwerte umrechnen.

Eine Intensitätseichung berücksichtigt alle einflußnehmenden Faktoren global. Im Fall der vorliegenden Apparatur sind dies vor allem die wellenlängenabhängige Transmission der Strahleinkopplung, das Spektrometer mit dispersionsabhängiger Apparatefunktion und der Spaltweite, und der Photomultiplier mit der spannungsabhängigen Verstärkung und wellenlängenabhängiger Photokathodenempfindlichkeit. Der Einfluß der einzelnen Teilfaktoren kann und muß nicht bestimmt werden, letztlich interessiert nur das Zusammenwirken aller Teile.

2.2. Die Auswahl der Eichquelle

Zur Eichung sind nur solche Strahlquellen geeignet, die im UV-Bereich eine genügend intensive Kontinuumsstrahlung abgeben. Linienstrahler sind nicht brauchbar, da bei der Eichung nur ein Teil der spektralen Bandbreite des Spektrometers "ausgeleuchtet" wird und sich somit später bei Messung kontinuierlicher Strahlung ein falsch hoher Wert ergäbe. Normale Quecksilberstrahler scheiden damit aus, eine kalibrierte Quecksilber-Hochdrucklampe stand nicht zur Verfügung (29). Die Wasserstoff-Lampe wird sehr oft als UV-Normal verwendet, sie hat jedoch eine relativ geringe Intensität und ist in der Handhabung schwierig. Bei Verwendung oben genannter Strahlenquellen liegt eine weitere Schwierigkeit darin begründet, daß im allgemeinen lediglich die Leuchtdichte im Zentrum der Entladung angegeben ist; für die Eichung des Spektrometers ist jedoch die Bestrahlungsstärke an der Strahleinkopplung maßgeblich, eine Umrechnung von der Leuchtdichte in die Bestrahlungsstärke ist nur mit Hilfe aufwendiger Blendenkonstruktionen zur Ausblendung peripherer Anteile der Entladung möglich.

Aus den oben genannten Gründen mußte auf Temperaturstrahler zurückgegriffen werden. Wegen des mit steigender Lampenleistung überproportional ansteigenden UV-Anteils kommen dabei nur Strahler hoher Wattleistung in Frage. Am besten geeignet wäre eine geeichte Wolfram-Band-Lampe, aus Kostengründen war jedoch eine derartige Anschaffung im Rahmen der Arbeit nicht möglich.

Es mußte daher auf eine Hochleistungs-Beleuchtungslampe mit Quarzglaskolben* zurückgegriffen werden.

* OSRAM Halogenlampe 800 W, Nr. 64570

Die verwendete Lampe ist nicht einzeln kalibriert, es ist jedoch ein Meßprotokoll (Tab. 1) für die Typenreihe vorhanden, die Abweichungen innerhalb der Typenreihe sind nach Aussagen der Herstellerfirma erfahrungsgemäß klein. Die Lampe wurde entsprechend dem Meßprotokoll mit 2,95 A betrieben.

2.3. Die Durchführung der Intensitätseichung

Im Meßprotokoll ist die Strahlstärke der Halogenlampe senkrecht zur Längsrichtung der Lampe in Schritten von 5 nm gemessen. Die Bestrahlungsstärke an der Strahleinkopplung errechnet man aus der Strahlstärke über das quadratische Abstandsgesetz. Voraussetzung für die Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes ist die Abschirmung aller indirekten Strahlung.

Es wurde daher ein geschlossenes Lampengehäuse konstruiert: Die direkte Strahlung tritt durch eine schlitzförmige Öffnung aus, über der die Lampe - in drei Richtungen justierbar - befestigt ist. Das Gehäuse ist innen mit reflexionsarmen, schwarzen Mattlack überzogen, zur besseren Kühlung wird die durch die Lampe erhitzte Luft kontinuierlich abgesaugt.

Die Intensitätseichung wurde in der später bei den Messungen verwendeten Anordnung und Einstellung durchgeführt (siehe III, 6). Bei zwanzig Wellenlängen, die in Abb. 13 gekennzeichnet sind, wurde die Intensität jeweils fünfmal gemessen und ein Mittelwert gebildet. Durch Quotientenbildung des gemessenen Wertes mit dem im Meßprotokoll angegebenen Wert ergibt sich ein Eichwert für jede der gemessenen Wellenlängen, in der elektronischen Datenverarbeitung wird durch Interpolation eine Eichfunktion errechnet. Die Eichfunktion

Lambda :		Watt /sr	Lambda :		Watt /sr
250 nm :	1.3104E-04		430 nm :	2.5892E-02	
255 nm :	1.9247E-04		435 nm :	2.7558E-02	
260 nm :	2.5390E-04		440 nm :	2.9364E-02	
265 nm :	3.3094E-04		445 nm :	3.1172E-02	
270 nm :	4.2711E-04		450 nm :	3.3069E-02	
275 nm :	5.3434E-04		455 nm :	3.5046E-02	
280 nm :	6.5713E-04		460 nm :	3.7011E-02	
285 nm :	8.1175E-04		465 nm :	3.9128E-02	
290 nm :	9.7943E-04		470 nm :	4.1315E-02	
295 nm :	1.1814E-03		475 nm :	4.3533E-02	
300 nm :	1.4213E-03		480 nm :	4.5676E-02	
305 nm :	1.6761E-03		485 nm :	4.7956E-02	
310 nm :	1.9814E-03		490 nm :	4.9986E-02	
315 nm :	2.3226E-03		495 nm :	5.2178E-02	
320 nm :	2.7012E-03		500 nm :	5.4481E-02	
325 nm :	3.1303E-03		505 nm :	5.6811E-02	
330 nm :	3.6059E-03		510 nm :	5.9163E-02	
335 nm :	4.1501E-03		515 nm :	6.1507E-02	
340 nm :	4.7202E-03		520 nm :	6.3881E-02	
345 nm :	5.4121E-03		525 nm :	6.6241E-02	
350 nm :	6.1116E-03		530 nm :	6.8702E-02	
355 nm :	6.8899E-03		535 nm :	7.1061E-02	
360 nm :	7.6810E-03		540 nm :	7.3406E-02	
365 nm :	8.5813E-03		545 nm :	7.5781E-02	
370 nm :	9.5678E-03		550 nm :	7.8405E-02	
375 nm :	1.0689E-02		555 nm :	8.0827E-02	
380 nm :	1.1759E-02		560 nm :	8.3135E-02	
385 nm :	1.2873E-02		565 nm :	8.5503E-02	
390 nm :	1.4030E-02		570 nm :	8.7716E-02	
395 nm :	1.5296E-02		575 nm :	9.0112E-02	
400 nm :	1.6622E-02		580 nm :	9.2371E-02	
405 nm :	1.7970E-02		585 nm :	9.4646E-02	
410 nm :	1.9477E-02		590 nm :	9.6866E-02	
415 nm :	2.0953E-02		595 nm :	9.9103E-02	
420 nm :	2.2603E-02		600 nm :	1.0137E-01	
425 nm :	2.4236E-02		605 nm :	1.0377E-01	

Tab. 1

Strahlstärke der Osram-Halogenlampe 800 W, senkrecht zur Längsrichtung der Lampe
(Osram Meßprotokoll FL/L-M 0/82, Kennziffer 82-80; A2/57)

wird aus praktischen Gründen zerlegt in einen dimensionsbehafteten Eichfaktor und eine Eichkurve mit dimensionslosen Werten zwischen Null und Zehn.

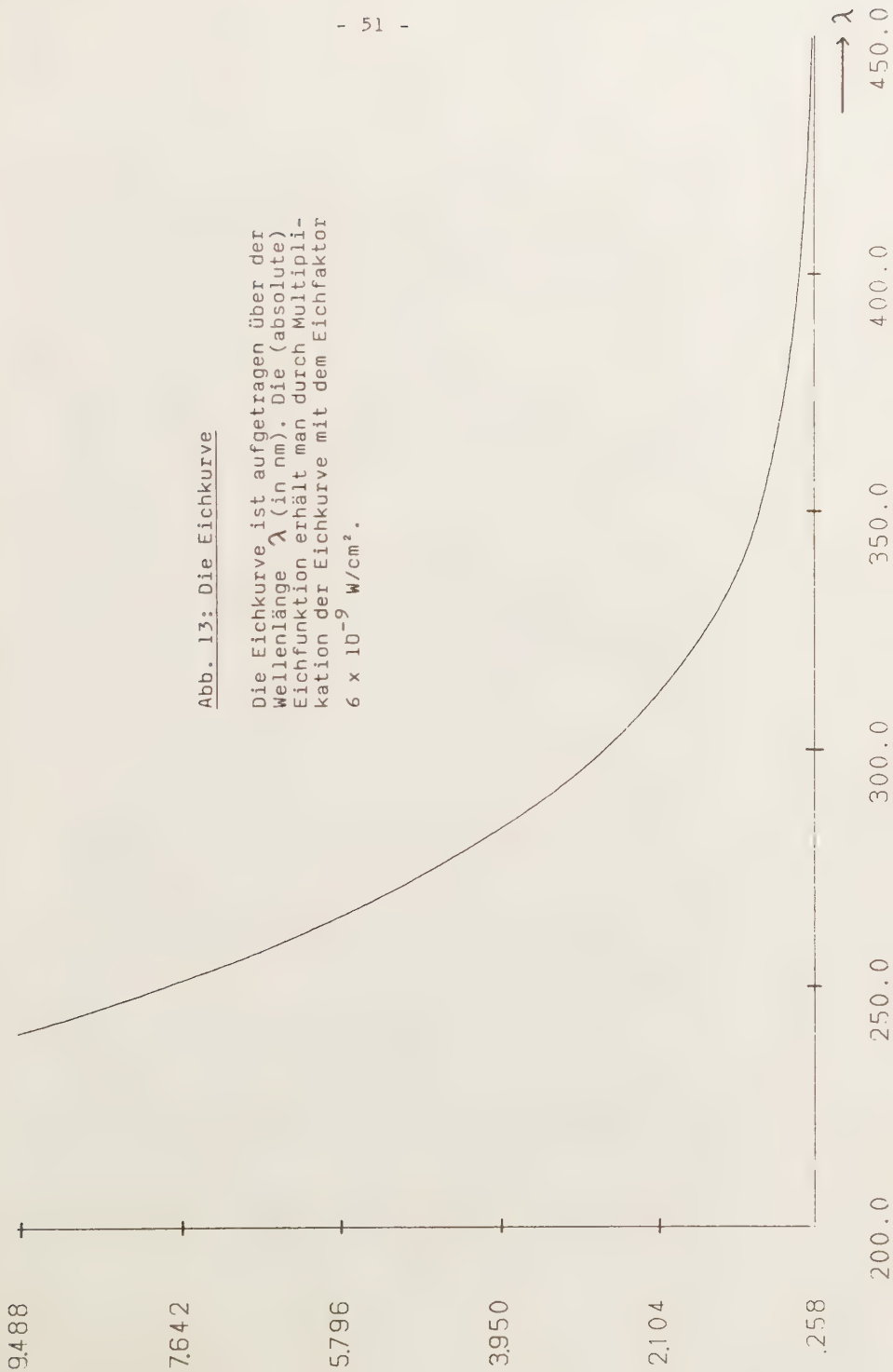
2.4. Die Eichfunktion

Die Abb. 13 zeigt die ermittelte Eichkurve des Spektrographen, aufgetragen über der Wellenlänge. Dabei ist von der gemessenen Eichfunktion der Eichfaktor $6 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2$ abgespalten, sodaß die Eichkurve dimensionslos ist. Bei den Berechnungen in der elektronischen Datenverarbeitung wird eher die Darstellung über der Schrittzahl verwendet, diese Kurve ist weiter unten (Abb. 15) dargestellt. Bei Betrachtung der Eichkurve fällt auf, daß sie zu kurzen Wellenlängen hin sehr stark ansteigt. Mehrere Gründe sind dafür verantwortlich. Der Hauptanteil ist auf die nichtlineare Dispersionskurve des im Spektrometer verwendeten Quarzprismas zurückzuführen, denn dadurch wird das Spektrum bei kürzeren Wellenlängen weiter "gedehnt", sodaß zu kürzeren Wellenlängen hin ein immer kleiner werdender Spektralbereich durch den Austrittsspalt ausgeblendet und im Photomultiplier registriert wird (siehe z. B. HÖFERT (26)). Daneben sinkt auch die Empfindlichkeit des Photomultipliers zu kürzeren Wellenlängen hin (15); außerdem dürfte die Transmission der Strahleinkopplung wellenlängenabhängig sein.

Die Eichkurve legt eine relative Intensitätseichung fest, sie wurde in der Datenverarbeitungsanlage* abgespeichert. Die aufbereiteten Spektren geben also eine intensitätsgerechte Abbildung in relativem Maßstab.

Der Absolutwert der Intensität wird aus den Relativwerten mit Hilfe eines wellenlängenunabhängigen Maß-

* CDC Cyber 175, Leibniz Rechenzentrum München



stabfaktors errechnet. Dabei muß die Einstellung des Potentiometers an der Empfindlichkeitseinstellung sowie die Größe der Eintrittsblende an der Strahleinkopplung berücksichtigt werden. Die Intensitätseichung wurde mit einer Potentiometereinstellung von 250 Kiloohm, bei 100 cm Abstand Lampe - Strahleinkopplung und ohne zusätzliche Blende an der Strahleinkopplung durchgeführt. Eine zusätzliche Blende vermindert die Anzeige am Meßinstrument und erhöht dementsprechend den Maßstabfaktor linear im Verhältnis der Eintrittsfläche ohne (F) bzw. mit zusätzlicher Blende (F'). Analog ändert sich der Maßstabfaktor bei Änderung der Potentiometereinstellung aufgrund des Ohmschen Gesetzes linear im Verhältnis der Teilwiderstände. Zur Ermittlung der spektralen Bestrahlungsstärke aus der Meßanzeige U des Digitalvoltmeters (in mV) ergibt sich folgende Formel:

$$I(\lambda) = U_{\lambda} \times \text{Eichkurve}(\lambda) \times \frac{250}{R'} \times \frac{F}{F'} \times 6 \times 10^{-9} \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right)$$

(falls U_{λ} in mV und R' in Kiloohm)

Dabei bedeutet R' den bei der Messung gewählten Widerstand für die Empfindlichkeitseinstellung. $\frac{F}{F'}$ hat den Wert 1 ohne zusätzliche Blende, mit der zusätzlichen Blende an der Strahleinkopplung ergibt sich der Wert 18,3 (Dieser Wert wurde durch Intensitätsmessung mit und ohne Blende und anschließende Quotientenbildung ermittelt).

Zur Weiterverarbeitung in der Datenverarbeitung wird auf dem Lochstreifen jede Zahl mit fünf Ziffern ohne Komma dargestellt (20000 statt 200,0 mV), sodaß dann der Eichfaktor $6 \times 10^{-11} \text{ W/cm}^2$ verwendet werden muß:

$$I(\lambda) = \text{FSV} \times \text{Eichkurve}(\lambda) \times \frac{250}{R'} \times \frac{F}{F'} \times 6 \times 10^{-11} \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right)$$

falls FSV der dimensionslose Fernschreibwert mit fünf Ziffern ist. Dieser Eichfaktor ist für alle mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung errechneten Ergebnisse gültig.

3. Einige Messungen zu Prüfzwecken

Nach Fertigstellung der Apparatur und nach Abschluß der Messungen wurden mehrere Kontrollmessungen durchgeführt, um Aussagen über die Langzeitkonstanz der Anlage zu erhalten:

Die Intensitätseichung wurde bei den Wellenlängen 260 nm, 310 nm und 400 nm wiederholt. Dabei darf davon ausgegangen werden, daß die Quarzlampe (im unbe- nutzten Zustand) kaum Alterungserscheinungen zeigt. Statt des vor den Messungen ermittelten Eichfaktors von $6 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2$ ergab sich nach vier Monaten bei 260 nm $6,36 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2$, bei 210 nm $6,25 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2$ und bei 400 nm $6,21 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2$. Das bedeutet, daß die Empfindlichkeit der Apparatur geringfügig abge- nommen hat, dies dürfte fast ausschließlich Folge der abnehmenden Empfindlichkeit des Photomultipliers sein; denn während einer längeren Betriebsdauer wird sowohl die Quantenausbeute der Photokathode wie auch die Sekundärelektronenausbeute des Dynodenmaterials leicht reduziert. Die Abweichungen lagen jedoch nach Abschluß der gesamten Meßreihe bei kurzen Wellen- längen bei 6%, bei längeren deutlich darunter.

Die Wellenlängenskala des Spektrometers zeigte keine meßbare Abweichung nach Abschluß der Messungen. Auch der Schrittmotor zeigte aufgrund seiner Arbeitsweise mit magnetomechanischer Rasterung keinerlei Ver- änderungen.

Zur Dokumentation der erreichten Qualität sind in Abb. 14 zwei Spektren dargestellt, die im Abstand von acht Wochen aufgezeichnet wurden. Zur besseren Auflösung wurde dabei die Spaltbreite auf 0,08 mm eingestellt und die kleinste Geschwindigkeit am Wechselgetriebe gewählt. Als Strahlenquelle diente die Hafi 500*, vor Beginn der Messung wurde jeweils eine Einbrennzeit von 15 Minuten eingehalten. Man sieht die sehr gute Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität der Wellenlängeneinstellung, der Schrittweite und der Intensitäten; die Linienform ist praktisch identisch.

4. Die Genauigkeit der Eichung

Die Genauigkeit der Intensitätseichung hängt im wesentlichen ab von der verwendeten Eichquelle. Im Rahmen dieser Arbeit stand kein direkt kalibrierter UV-Standard zur Verfügung, es mußte vielmehr zurückgegriffen werden auf die Temperaturstrahlung einer Wolfram-Hochleistungs-Projektionslampe, für die eine Typ-eichung vorlag. Von Seiten der Herstellerfirma wurde eine Streubreite von etwa 30% im verwendeten Wellenlängenbereich angegeben, gegenüber dieser Größenordnung sind die anderen bei der Eichung auftretenden Störfaktoren sicher vernachlässigbar. Die angegebene Größenordnung von 30% gilt für die Genauigkeit der Absoluteichung.

Die Relativeichung ist dagegen wesentlich genauer, da der relative Verlauf der spektralen Intensität im wesentlichen festgelegt wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz für schwarze Strahler, das bei Hochleistungs-Projektionslampen in sehr guter Näherung er-

* Fa. HANAU Quarzlampen GmbH



Abb. 14: Die Reproduzierbarkeit der Wellenlängen- und Intensitätseinstellung

Ein Spektralausschnitt wurde im Abstand von acht Wochen mit kleinster Geschwindigkeit und Spaltweite von 0,08 mm aufgezeichnet, die Intensität des unverarbeiteten Spektrums ist gegen die Schrittzahl aufgetragen. Dargestellt sind die Hauptlinien 366 nm, 405 nm und 436 nm, die Doppellinie 405/408 ist aufgelöst.

(Hafi 500, 1 m Bestrahlungsabstand, Empfindlichkeitseinstellung 250 kOhm, große Blendenöffnung)

füllt ist. Nach Angaben der Herstellerfirma darf im Mittel mit einer Genauigkeit der relativen Eichung besser als 5% gerechnet werden.

Es ist geplant, die Apparatur mit Hilfe einer Wolfram-Band-Lampe, die speziell kalibriert wurde, noch präziser nachzueichen. Für Vergleichsmessungen an verschiedenen Strahlquellen und biologische Messungen ist jedoch die erreichte Eichgenauigkeit ausreichend.

V. Die Verarbeitung der Daten

1. Einige Grundbegriffe und Definitionen

Im Hinblick auf spätere Erläuterungen sollen vorab einige Grundbegriffe definiert werden: Die spektrale Bestrahlungsstärke, kurz auch Intensität genannt, gibt an, welche Energiemenge in einem Wellenlängenintervall pro Zeiteinheit auf ein Flächenelement auftrifft. Summiert man über alle Wellenlängen auf, d. h. bildet man das Integral $I(\lambda) d\lambda$, so erhält man die Bestrahlungsstärke. Als Bestrahlungsstärke bezeichnet man also die pro Zeiteinheit auf eine Einheitsfläche auffallende Energie, gemessen etwa in Watt/cm^2 . Die Integration über die gesamte Bestrahlungsdauer ergibt die insgesamt aufgetroffene Energie, Bestrahlung genannt (Wsec/cm^2).

Die Schwellenbestrahlung (oft auch Schwellendosis genannt) gibt diejenige Energiemenge an, die zu einer genau definierten Veränderung der Haut führt. Als Beispiel sei hier eine gerade eben sichtbare Pigmentierung oder ein gerade sichtbares Erythem genannt; bei letzterem wird oft der Terminus MED (Minimale Erythem Dosis) gebraucht. Die Schwellenbestrahlung ist stark abhängig von der jeweils verwendeten Wellenlänge.

Der Reziprokwert der Schwellenbestrahlung ergibt - wieder in Abhängigkeit von der Wellenlänge - die (absolute) spektrale Wirkungsfunktion. Meist wird diese Größe bezogen auf den Maximalwert im betrachteten Wellenlängenbereich; man erhält die (relative) spektrale Wirkungsfunktion mit Werten zwischen 0 und 1 (dimensionslos). Ein hoher Wert der Wirkungsfunktion bei einer bestimmten Wellenlänge besagt, daß bei dieser

Wellenlänge eine geringe Bestrahlung genügt, die gewünschte Veränderung der Haut hervorzurufen; mit anderen Worten, Strahlung dieser Wellenlänge ist besonders effektiv.

Das Produkt aus spektraler Bestrahlungsstärke und relativer spektraler Wirkungsfunktion heißt biologisch wirksame spektrale Bestrahlungsstärke oder biologisch wirksame Intensität. Sie gibt an, wie groß der Beitrag zum betrachteten Effekt bei den verschiedenen Wellenlängen ist.

Summiert man alle diese Teilbeträge auf, d. h. bildet man das Wellenlängen-Integral über die biologisch wirksame Intensität, erhält man die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke.

Berechnungen dieser Art werden zweckmäßigerweise mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung ausgeführt. Dies soll an einem Beispiel dargestellt werden.

2. Die einzelnen Schritte der Aufbereitung der Daten

2.1. Die Rohdaten

Das Spektrometer gibt den zu jedem Schritt gehörenden Meßwert, wie oben beschrieben, über die Fernschreib-einheit sowohl als Papierausdruck wie auch auf 5 - Kanal- Lochstreifen aus. Jeder Meßwert besteht aus einem Leerschritt, einem Vorzeichen - wegen der negativen Polarität des Photomultiplier-Stroms gegen Masse hier negativ - und fünf Ziffernwerten. Jeweils neun Meßwerte bilden eine Zeile, dann folgt ein Wagen-rücklaufsignal, gegeben von der Steuereinheit. Als Beispiel sind hier einige Zeilen des Papierausdruckes abgebildet.

-009923	-01059	-01120	-01220	-01277	-01412	-01569	-01662	-01924
-02022	-02396	-02575	-03025	-03094	-03479	-03740	-04541	-04679
-05511	-05566	-06026	-06354	-06842	-06935	-06835	-07150	-07547
-07549	-07804	-07810	-08147	-08152	-08319	-08287	-08464	-08467
-08650	-08650	-08804	-08784	-09089	-09089	-09236	-09206	-09300
-09248	-09438	-09454	-09485	-09482	-09482	-09482	-09482	-09905
-09835	-09819	-09824	-09833	-09965	-09940	-10211	-10337	-10854
-10244	-10121	-10097	-10090	-10154	-10185	-10144	-10283	-10229
-10186	-10170	-10750	-11023	-10459	-10304	-10225	-10019	-10446
-10466	-10479	-10316	-10126	-10105	-10089	-10089	-11568	-11514
-10998	-10558	-09952	-09236	-09041	-09067	-11122	-11122	-11122
-08995	-09473	-09473	-12195	-11772	-09173	-09138	-08739	-08641
-08492	-08436	-08666	-08666	-08677	-08092	-10617	-09483	-08706
-08931	-10186	-10189	-09254	-10392	-14613	-14613	-09770	-09770
-09770	-09420	-09378	-09378	-09378	-09378	-14643	-14557	-17629
-17301	-16065	-16010	-15510	-15492	-15492	-15492	-15492	-15257

Alle Messungen beginnen bei der Wellenlänge 240 nm, d. h. der erste Meßwert ist der Wellenlänge 240 nm zugeordnet, der n-te Meßwert entspricht einem Umschalten des Schrittmotors um n-1 Schritte und ist - da der Schrittmotor keinen additiven Fehler zeigt - eindeutig einer Wellenlänge zugeordnet. Diese Zuordnung stellt die in Abb. 12 dargestellte Wellenlängeneichkurve dar.

Es ist jedoch rechnerisch günstiger, alle Berechnungen nicht bezogen auf Wellenlängen, sondern auf die Schrittzahl durchzuführen; erst bei der graphischen Darstellung wird die Umwandlung der Schrittzahl in eine Wellenlängenzahl durchgeführt.

2.2. Die Einspeicherung der Rohdaten

Es ist zweckmäßig, die Rohdaten aller Messungen in der EDV zu speichern. Das ermöglicht eine zügige Abwicklung aller Rechenschritte. Außerdem ist das wiederholte Einlesen des gleichen Lochstreifens zeitraubend und, was viel wichtiger ist, sehr

störanfällig.

Die Rohdaten werden dazu eingelesen und durch ein Konvertierungsprogramm* aus dem 5-Kanal-Binär-Code in die rechnerübliche Darstellung (Displaycode) übergeführt; das Ergebnis steht auf der Datei LS_i , wobei i die Nummer des Lochstreifens ist.

Im Permanentenspeicher steht eine Sammeldatei UVLSD für die Teildateien $LS_1, LS_2, \dots, LS_n$ mit den einzelnen Lochstreifeninhalten zur Verfügung. Die Teildateien werden mit Hilfe eines Anhängesprogrammes der Sammeldatei der Reihe nach hinzugefügt und sind dann auf UVLSD dauernd verfügbar.

2.3. Die Umrechnung mit Hilfe der Eichkurve

Wie oben dargestellt, ist der Meßwert für die Intensität durch einige Faktoren verzerrt, wobei die Apparatefunktion des Spektrometers als Folge einer nichtlinearen Wellenlängenskala den größten Einfluß hat. Die oben ermittelte Eichkurve gibt für jede Schrittzahl den zugehörigen Eichwert an. Durch Multiplikation des Meßwertes mit dem zugehörigen Eichwert erhält man den Intensitätswert in relativen Einheiten. Absolutwerte erhält man durch Multiplikation der relativen Werte mit dem konstanten Eichfaktor, der für eine bestimmte Empfindlichkeitseinstellung und Eintrittsfläche bei der Absoluteichung festgelegt wurde.

Als Kurve I in Abb. 15 sind die Rohmeßwerte eines UV-Strahlers, d. h. die Werte auf dem Lochstreifen, über der Schrittzahl aufgetragen. Die Kurve III

* siehe Anhang 3

ist das Produkt der Lochstreifenwerte mit dem zur entsprechenden Schrittzahl gehörenden Wert der Eichkurve, es ist eine Intensitätskurve in relativen Einheiten. Man beachte die sehr starke Veränderung der relativen Höhen der einzelnen Spektrallinien. Dies zeigt auch, daß eine Messung ohne Eichkorrektur eine sehr beschränkte Aussagekraft hat.

2.4. Die Bewertung mit einer Wirkungsfunktion

Das Produkt aus dem Intensitätswert und einer relativen spektralen Wirkungsfunktion ergibt die biologisch wirksame Intensität. Ein Beispiel für diesen Rechenschritt ist in Abb. 16 wiedergegeben. Kurve III ist die Intensitätskurve aus Abb. 15. Kurve IV ist die Erythemwirkungskurve nach DIN 5031 als Beispiel für eine relative spektrale Wirkungsfunktion. Die Kurve V schließlich stellt die erythemwirksame Intensität des verwendeten UV-Strahlers dar. Sie ist einmal in Abb. 17a im Größenverhältnis zur Kurve III dargestellt, die Abb. 16 zeigt die erythemwirksame Intensität in vergrößerter Darstellung.

2.5. Die Entzerrung auf eine lineare Wellenlängenskala

Die Darstellung der Spektren über der Schrittzahl führt zu einer merklichen Verzerrung gegenüber der üblichen Darstellung über der Wellenlänge. Im Bereich kurzer Wellenlängen ist das Spektrum stark gedehnt im Vergleich zum langwelligen Bereich. Dies wird deutlich, wenn man folgende Zuordnung bedenkt:

Legende zu Abb. 15, Abb. 16 und Abb. 17

Abb. 15 (S. 63): Die Intensitätseichung mit Hilfe der Eichkurve

Kurve I	Rohmeßwerte I_0 eines UV-Strahlers
Kurve II	Eichkurve
Kurve III	Intensitätskurve in relativen Einheiten

Abb. 16 (S. 64): Die Bewertung eines Spektrums mit einer Wirkungsfunktion

Kurve III	Intensitätskurve in relativen Einheiten
Kurve IV	Standarderythemwirkungsfunktion
Kurve V	Erythemwirksame Intensität in relativen Einheiten

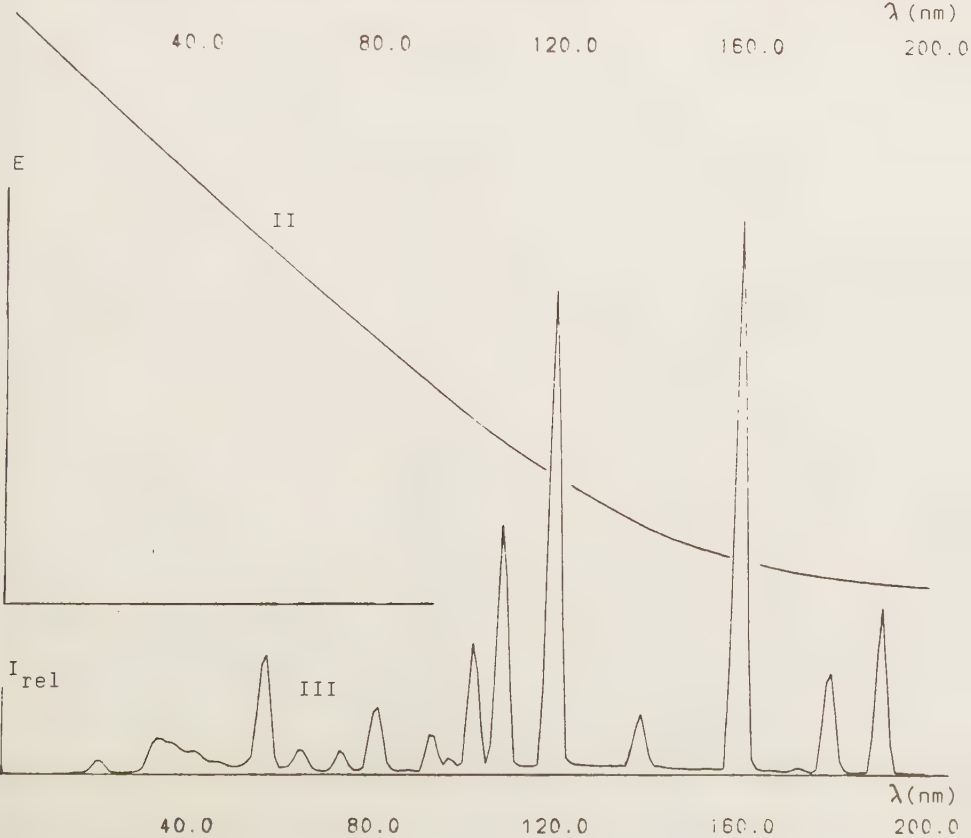
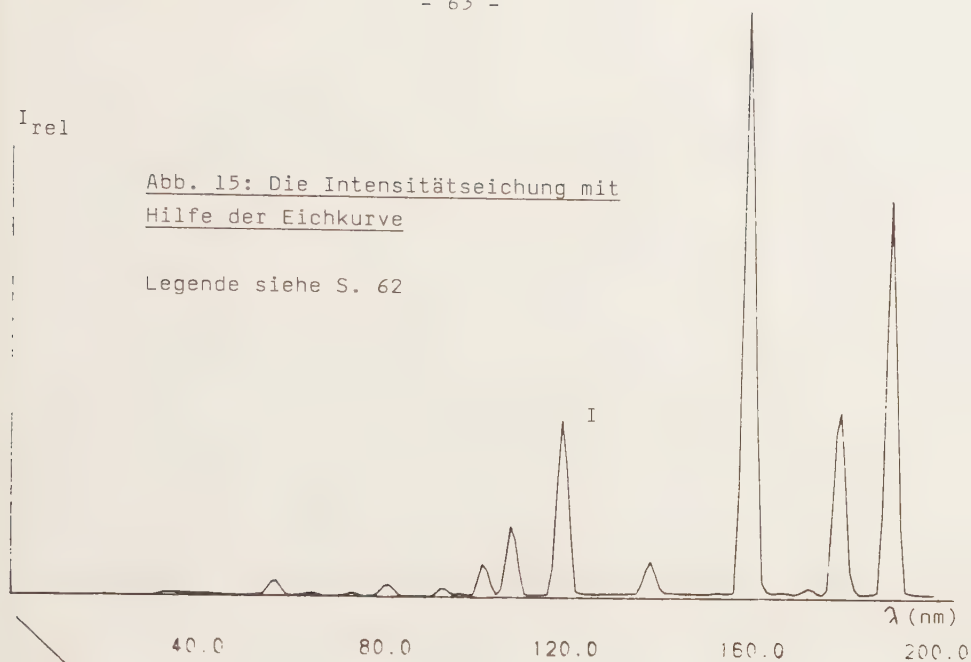
Abb. 17 (S. 65): Die Entzerrung auf eine lineare Wellenlängenskala

Abb. 17a	Darstellung der Spektralverteilung (III) und der zugehörigen erythemwirksamen Intensität (V) über der Schrittzahl n (im richtigen relativen Maßstab)
Abb. 17b	Darstellung der Spektralverteilung (III) und der erythemwirksamen Intensität (V) über der Wellenlänge

I_{rel}

Abb. 15: Die Intensitätseichung mit
Hilfe der Eichkurve

Legende siehe S. 62



I_{rel}

Abb. 16: Die Bewertung eines
Spektrums mit einer Wirkungs-
funktion

Legende siehe S. 62

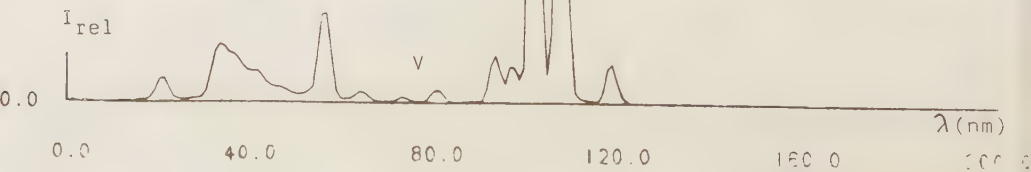
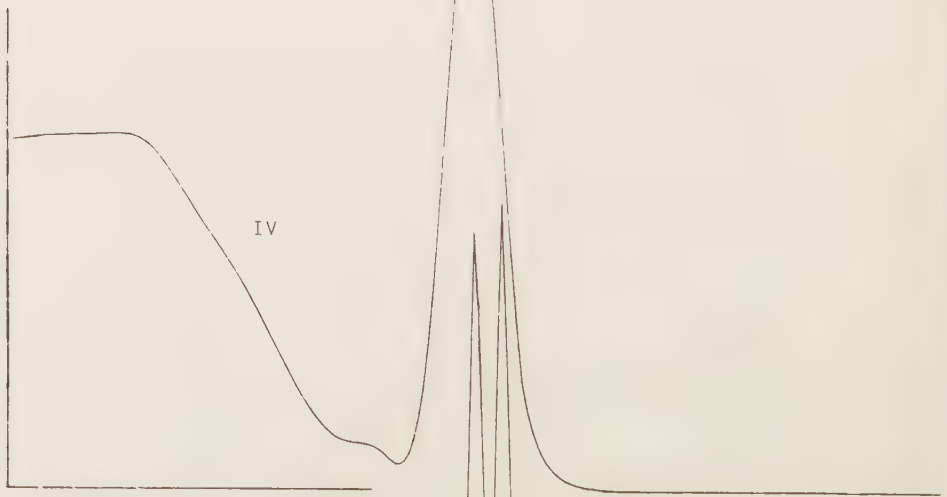
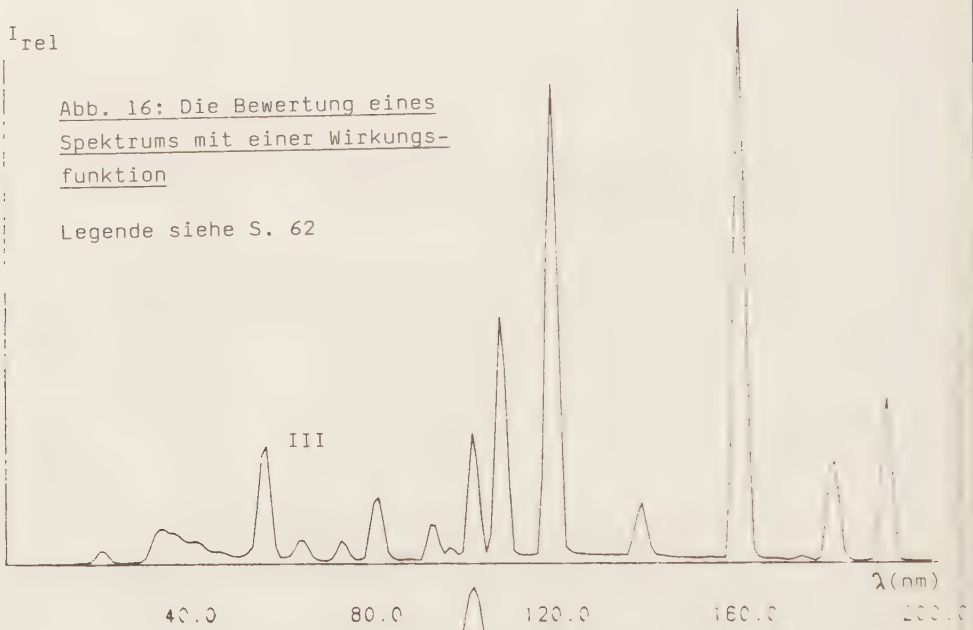


Abb. 17: Die Entzerrung
auf eine lineare Wellen-
längenskala

Abb. 17a

Legende siehe S. 62

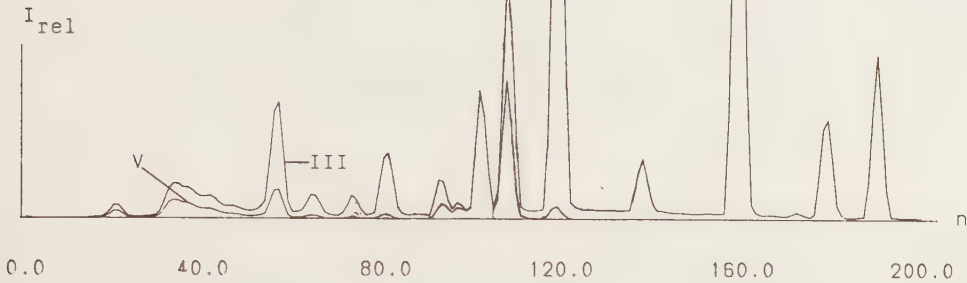
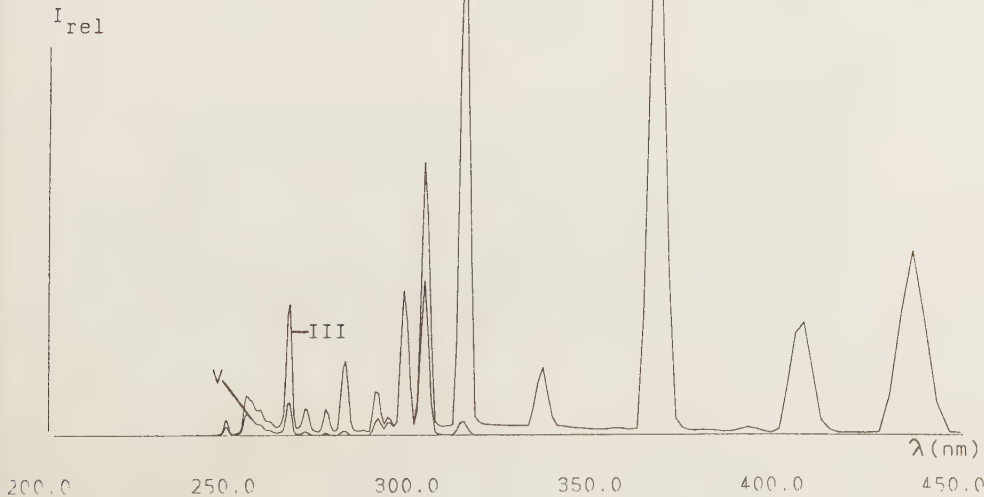


Abb. 17b

Legende siehe S. 62



Schritt 0	<—>	240,0 nm
Schritt 50	<—>	262,2 nm
Schritt 100	<—>	296,5 nm
Schritt 150	<—>	354,0 nm

Die Abb. 17 zeigt die Umwandlung der gezeigten Kurvenschar aus der Darstellung über der Schrittzahl (a) in eine Darstellung über der Wellenlänge (b). Dies führt zu einer Komprimierung im Bereich kürzerer Wellenlängen, die langwelligen Anteile werden auseinandergezogen.

2.6. Die Berechnung von Integralen

Zum Vergleich verschiedener Strahlenquellen können die spektrale Intensitätskurve und die verschiedenen biologisch wirksamen Intensitätskurven verwendet werden. Besser vergleichbar sind jedoch die aus diesen Kurven durch Bestimmung der eingeschlossenen Fläche - Integration - gewonnenen Zahlenwerte.

Die Integration wird numerisch ersetzt durch eine Summation über kleine Intervalle. Da die Meßkurven in Schrittintervallen vorliegen, wird die Summation über kleine Wellenlängenintervalle zweckmäßigerweise ersetzt durch eine Summation über die einzelnen Schritte.

Berechnet werden soll das Integral über die Wellenlänge einer Funktion $F(\lambda)$. Durch die Substitutionsregel kann dieses Integral über die Wellenlänge umgewandelt werden in ein Integral über die (zunächst stetig angenommene) Variable n , wobei der Zusammenhang zwischen λ und n durch die Funktion $\lambda(n)$ gegeben ist und die Integrationsgrenzen entsprechend zu wählen sind:

$$\int F(\lambda) d\lambda = \int F(\lambda(n)) \frac{d\lambda}{dn} dn$$

Wandelt man die Integration in eine Summation über kleine Intervalle um, so ergibt sich:

$$\sum F(\lambda(n)) \frac{\Delta \lambda}{\Delta n} \Delta n$$

Dies vereinfacht sich unter der Annahme, daß n jeweils ein Schritt ist zu dem Schema:

$$\int F(\lambda) d\lambda \longrightarrow \sum F(\lambda_n) \Delta \lambda_n$$

Dabei ist $F(\lambda_n)$ der Wert des Integranden beim Schritt n , und $\Delta \lambda_n$ die Wellenlängendifferenz zwischen dem n -ten und $(n+1)$ -ten Schritt.

Als Integrand werden die spektralen Werte der Intensität bzw. der biologisch wirksamen Intensität eingesetzt; summiert wird über alle n , außer bei der Bestimmung der Intervallintensitäten UV-A, UV-B und UV-C:

UV-A	120	$\leq$	n	$\leq$	174
UV-B	80	$\leq$	n	$\leq$	119
UV-C	0	$\leq$	n	$\leq$	79

2.7. Die Ausgabe der Meßergebnisse und die Normierung

Die Ergebnisse werden, soweit es sich um Zahlen handelt, am Bildschirm dargestellt oder ausgedruckt. Graphische Darstellungen können mit Hilfe eines Plot-Programmes angefertigt werden. Als Abszisse wird neben der Schrittzahl n meist die Wellenlänge λ aufgetragen. Die Kurven selbst können als polygonale Züge, d. h. zwischen den Meßpunkten wird eine Gerade

als Verbindungslinie gezogen, oder durch Annäherung durch eine Kurve höherer Ordnung ("Kubische Splines") als glatter Kurvenzug dargestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Meßkurven meist die polygonale Darstellung gewählt.

Zu beachten ist, daß das verwendete Plot-Programm den Maximalwert auf eine vorher wählbare Höhe zeichnet, und alle Kurven derselben Graphik mit demselben Maßstabsfaktor multipliziert. Verschiedene Graphiken haben verschiedene Maßstabsfaktoren.

Zur Festlegung der Absolutwerte wurde die Apparatur mit einem Strahler bekannter Intensität geeicht. Die wellenlängenabhängigen Einflußgrößen sind in der Eichkurve berücksichtigt. Wegen des beschränkten Meßumfanges des Photomultipliers und der digitalen Registrierapparatur wird bei jeder Messung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke der zu messenden Lichtquelle die Meßempfindlichkeit neu eingestellt. Dieser Wert ist für die ganze Messung gleich, er muß durch einen zusätzlichen wellenlängenunabhängigen und somit für alle Meßpunkte gleichen Korrekturfaktor berücksichtigt werden (IV, 2.4.).

Bei dem verwendeten Rechenprogramm können die Werte für die Empfindlichkeitseinstellung noch nicht eingegeben und verrechnet werden; sie werden daher bei den Endergebnissen in Form des Korrekturfaktors berücksichtigt. In analoger Weise wird der Ordinatenmaßstab bei dessen Festlegung ja auch noch die Normierung des Plot-Programmes berücksichtigt werden muß, zur Zeit noch nachträglich angebracht. Es ist geplant, die Werte der Empfindlichkeitseinstellung

zu Beginn eines Lochstreifens festzuhalten und das Programm so zu ändern, daß Absolutwerte ausgedruckt und als Ordinatenmaßstab angegeben werden.

VI. Die biologische Wirkung der UV-Strahlung auf die Haut - Literaturübersicht und Planung der Messungen

Die biologische Wirkung der ultravioletten Strahlung auf die Haut reicht von der kosmetisch erwünschten Bräunung bis zu den verschiedenen Stadien der Licht-entzündung, vom Erythem bis zur Zerstörung der Haut im Sinne einer Verbrennung.

1. Der biologisch bedeutsame UV-Bereich

Bestrahlung der Haut mit verschiedenen Wellenlängen führt zu einer in Art und Stärke unterschiedlichen Reaktion. Dies führte im medizinischen Bereich zu einer groben Unterteilung des ultravioletten Spektrums in drei Gruppen. Der langwellige Teil, "UV-A" genannt reicht von 315 nm bis 400 nm. Die langwellige Grenze entspricht etwa dem kurzwelligen Ende des sichtbaren Spektrums. Der Einschnitt bei 315 nm wurde gewählt, weil Bestrahlung mit kürzerer, also energiereicherer Wellenlänge zu einer deutlichen Rötung der Haut führt; außerdem beginnt in diesem Bereich die Absorptionskurve der DNS sowie die Wirksamkeitskurve für die Vitamin-D-Bildung merklich anzusteigen (28).

Der "UV-B"-Bereich erstreckt sich von 280 nm bis 315 nm. Die Grenze bei 280 nm ist bedingt durch die hohe Absorption des Stratum corneum der Haut und einer möglicherweise dadurch hervorgerufenen Abnahme der Erythemwirksamkeit (42). Zu kurzen Wellenlängen schließt sich das "UV-C" an mit einer kurzwelligen Grenze bei 200 nm, was in etwa der Sauerstoff-Absorptionskante entspricht. Unterhalb 200 nm schließt sich das "Vakuum-UV" an. Da im Rahmen dieser Arbeit nur Messungen oberhalb 240 nm durchgeführt werden, wird mit UV-C hier nur der Bereich 240 nm bis 280 nm

umschrieben.

Die verschiedenen Bereiche und deren Wirkung werden stark vereinfachend oft folgendermaßen charakterisiert: UV-A-Bestrahlung führt zu direkter Pigmentierung, UV-B zum Erythem; UV-C ist Ursache der Strahlenkonjunktivitis und hat außerdem eine stark bakterizide und möglicherweise mutagene Wirkung. Die scharfe Trennung von UV-B und UV-C ist jedoch, vor allem hinsichtlich der Erythemwirkung, nicht gerechtfertigt.

2. Die direkte Pigmentierung

Seit etwa 1930 wird die Frage diskutiert, inwieweit es eine Pigmentierung ohne vorhergehendes Erythem gebe, die direkte Pigmentierung oder, da sie praktisch ohne Latenz auftritt, auch Sofortpigmentierung genannt. HAUSSER und VAHLE (18) berichten, keine Pigmentierung ohne vorhergehendes Erythem beobachtet zu haben. Isolde HAÜSER (16) führt dies auf die Verwendung einer ungeeigneten Lampe zurück und findet mit der Kohlebogenlampe eine deutliche Sofortpigmentierung fast ohne Erythem mit maximaler Empfindlichkeit bei 385 nm. HENSCHKE und SCHULZE (23) bestimmten mit Hilfe eines Quarzspektrographen die spektrale Wirkungskurve für die direkte Pigmentierung. Diese Kurve ist in Abb. 18 dargestellt. Sie steigt bei 300 nm stark an, erreicht ein Maximum bei etwa 340 nm und fällt flach zu langen Wellenlängen ab. Die damit erreichte Pigmentierung hat eine Latenzzeit unter zwei Minuten und erreicht das Maximum bereits in 30 Minuten. Es zeigen sich sehr starke interindividuelle Schwankungen der Pigmentbildung.

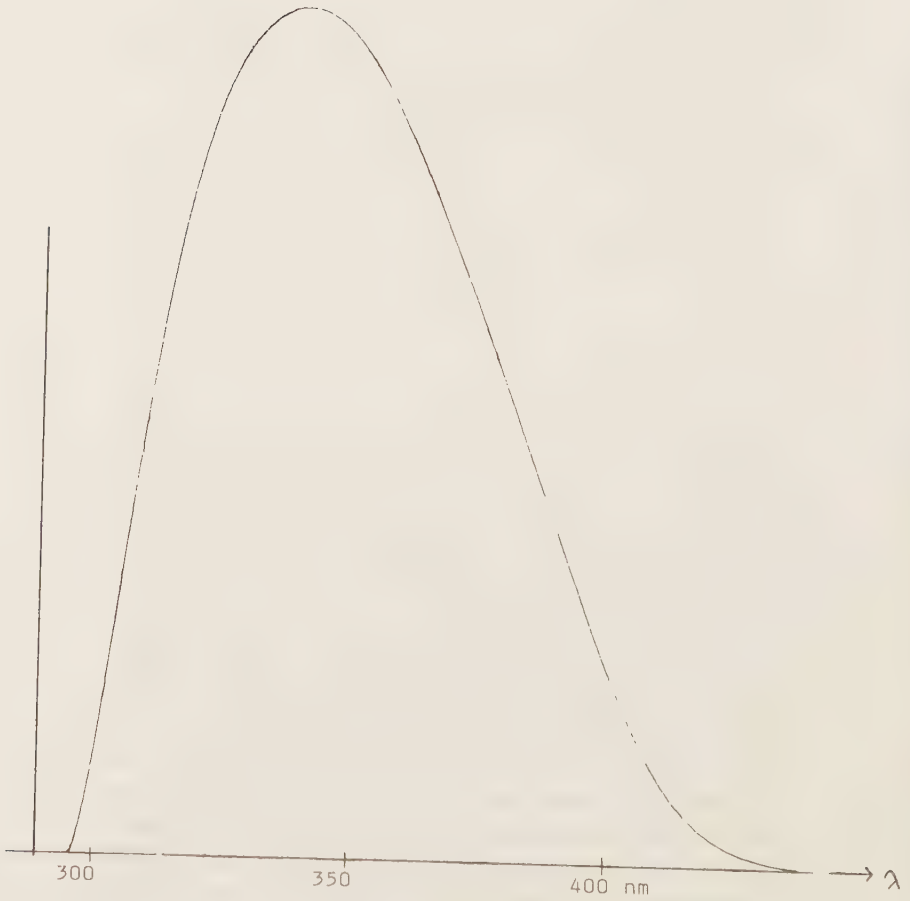


Abb. 18:

Die spektrale Wirkungsfunktion für die direkte
Pigmentierung (nach HENSCHKE und SCHULZE (23))

Zur Erreichung einer Schwellenreaktion, d. h. einer eben sichtbaren Pigmentierung, wird bei 340 nm nach HENSCHKE und SCHULZE (24) eine Bestrahlung mit 20 Wsec/cm² benötigt. WISKEMANN und WISSER (65) bestimmten eine Schwellenbestrahlung von 7,5 Wsec/cm² und nach MUTZHAS (36) genügt eine Bestrahlung von 10 Wsec/cm². Das ist etwa das 500-fache bis 10 000-fache der Bestrahlung, die nötig ist, um bei 297 nm ein Erythem zu erzeugen (vgl. VI, 3). Dies erklärt auch, warum bei Bestrahlungsversuchen meist keine direkte Pigmentierung zu beobachten ist: die verwendeten Lampen haben eine so starke erythemwirksame Komponente, daß die zur Erzeugung einer direkten Pigmentierung erforderliche Dosis wegen der Erythem-bildung nicht appliziert werden kann.

3. Die Erythemwirksamkeit der UV-Strahlung

Das Ausmaß und der Ablauf der Erythembildung nach UV-Bestrahlung der Haut ist von vielen Faktoren abhängig, etwa vom Bestrahlungsort (Rücken, Extremitäten), von der Größe des Bestrahlungsfeldes (bei sehr kleinen Feldern) oder von der individuellen Empfindlichkeit (jahreszeitliche Schwankungen, Hormonstatus, Hornschichtdicke usw.), um nur einige zu nennen (vgl. EVERETT, SAYRE, OLSON (12, 38, 39)). Am besten untersucht ist der Einfluß, den die Wellenlänge der Strahlung ausübt. Bereits 1921 veröffentlichten HAUSSER und VAHLE (18) eine Erythemwirksamkeitskurve mit einem ausgeprägten Maximum bei 297 nm. Verbesserte Messungen folgten in den nächsten Jahren, sie sind in der Abb. 19 dargestellt. Dabei verwendeten HAUSSER (17) sowie COBLENTZ und STAIR (8) zur Bestimmung einen Spektrographen mit dem Linienspektrum

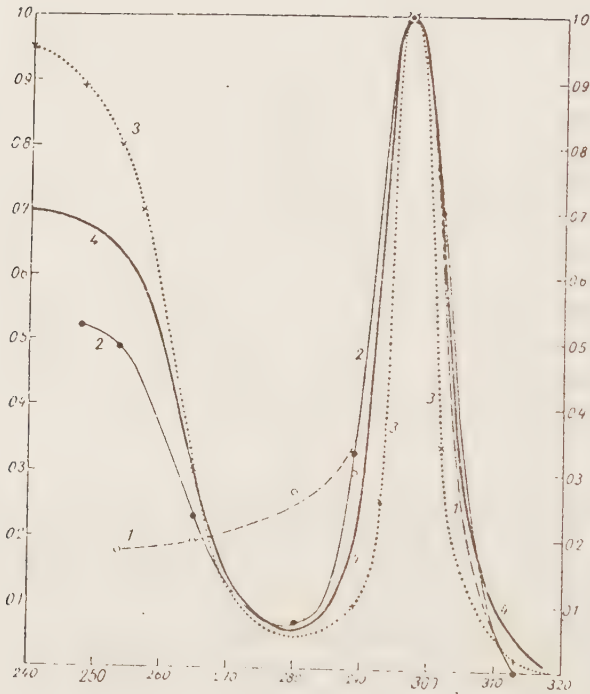


Abb. 19: Verschiedene "Standard"-Erythem-
wirkungsfunktionen

- Kurve 1: HAUSSEER und VAHLE, 1921 (18)
Kurve 2: HAUSSEER, 1928 (17)
Kurve 2: LUCKIESH, HOLLIDAY und TAYLOR,
1930 (32)
Kurve 4: COBLENTZ und STAIR, 1934 ((

einer Hg-Lampe als Lichtquelle, wogegen LUCKIESH et al. (32) mit gefilterter Hg-Strahlung arbeiteten.

Auch die Erythemwirksamkeitskurve der DIN 5031, die auf Messungen von URBACH et al. (63) zurückgeht, zeigt einen ähnlichen Verlauf.

Kurven dieser Art werden oft auch als Standard-Erythemwirkungsfunktionen bezeichnet. Sie sind gekennzeichnet durch ein absolutes Maximum bei 297 nm mit einem steilen Abfall auf der langwelligen wie auch auf der kurzwelligen Seite. Bei 280 nm ist ein deutliches Minimum ausgeprägt mit einer relativen Wirksamkeit von weniger als 10% des Maximalwertes; nach kurzen Wellenlängen hin zeigt sich ein unterschiedlich steiler Anstieg auf Werte zwischen 55% und 95% des Maximalwertes. Die großen Schwankungen zum kurzwelligen Ende hin liegen sicher weit außerhalb der Meßgenauigkeit. Man wird sich daher fragen, ob sie auf einem systematischen Fehler der jeweiligen Messungen beruhen oder ob sie vielleicht eine biologische Ursache haben. Unabhängig davon ist jedoch allen gemeinsam, daß zur Erzeugung eines Erythems bei der Wellenlänge 250 nm eine größere Energiemenge nötig ist als bei 300 nm.

Der Verlauf der Standard-Erythemkurven wird unter anderem erklärt mit der Durchlässigkeit der Hornschicht (TRONNIER und MERTEN (59)). Unterhalb etwa 290 nm nimmt die Durchlässigkeit stark ab und erreicht bei 280 nm ein Minimum. Dadurch wird ein Teil der einfallenden UV-Strahlung in der Hornschicht absorbiert und kann nicht mehr zur Erzeugung eines Erythems beitragen, man erhält ein Minimum in der Wirkungskurve.

Bereits 1933 veröffentlichten ADAMS, BORNES und FORSYTHE (1) eine Schar von Erythemwirkungsfunktionen

für verschieden starke Erythemgrade (Abb. 20). Danach ist zur Erzeugung eines eben sichtbaren Erythems E_0 bei der Wellenlänge 250 nm nur etwa der 50. Teil der Energie nötig, die bei der Wellenlänge 300 nm ein gerade sichtbares Erythem erzeugt. Mit zunehmendem Rötungsgrad nimmt dann die Effektivität der Wellenlänge 250 nm mehr und mehr ab. Die Kurvenschar ist lediglich eine spezielle Darstellung der bereits von HAUSSER und VAHLE 1927 (19) beschriebenen Gesetzmäßigkeit, daß die "Gradation" mit zunehmender Wellenlänge zunimmt: anders ausgedrückt, bei kurzen Wellenlängen nimmt die Stärke des Erythems bei Steigerung der Bestrahlung nicht entfernt in dem Maße zu wie bei langen Wellenlängen.

Auch MAGNUS (33) findet bei seinen Bestrahlungsversuchen die "Standard-Erythem-Kurve" nur grob bestätigt: Von vierzehn gesunden Versuchspersonen hatten nur zwei die maximale Erythemempfindlichkeit bei ca. 295 nm. Die restlichen zwölf hatten bei 250 nm eine größere Empfindlichkeit als bei 295 nm. Allerdings zeigten fast alle Versuchspersonen im Bereich 270 nm bis 280 nm eine geringere Erythemwirkung als bei 250 nm bzw. 300 nm (angedeutetes Minimum).

ROTTIER (42, 44) beschäftigt sich in mehreren Veröffentlichungen mit der Erythemempfindlichkeit bei 250 nm bzw. 300 nm. Er fand eine sehr große Variationsbreite für die zur Erzeugung eines Erythems bei 250 nm bzw. 300 nm nötige Energie. Nach seiner Vorstellung ist dies auf die unterschiedliche Dicke der Hornschicht zurückzuführen: dadurch wird ein unterschiedlicher Anteil der auffallenden UV-Strahlung absorbiert, ehe sie auf die erythemwirksame Zone fällt, die nach ROTTIER im subcornealen Bereich

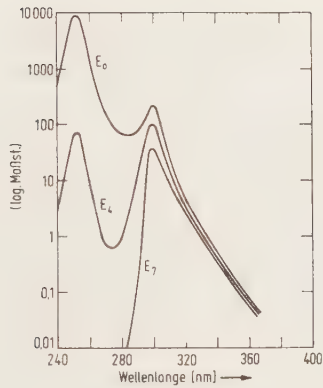


Abb. 20: Erythemwirkungsfunktionen für die Erythemschwelle E_0 , ein mittelstarkes Erythem E_4 und ein starkes Erythem E_7 (nach ADAMS, BORNES und FORSYTHE (1))



Abb. 21: Erythemwirkungsfunktion nach EVERETT, OLSON und SAYRE (12)

liegt. Da außerdem der Absorptionskoeffizient der Hornschicht für 250 nm größer als für 300 nm ist, ergeben sich für verschiedene Hornschichtdicken - gleiche subcorneale Erythemempfindlichkeit vorausgesetzt - unterschiedliche Erythemwirkungsfunktionen: Je dicker die Hornschicht, desto kleiner wird der Wert der spektralen Wirkungsfunktion bei 250 nm gegenüber dem Wert bei 300 nm sein, d. h. die Form der Wirkungsfunktion hängt nach der Vorstellung ROTTIERs ab von der Dicke der Hornschicht. Aus dem gleichen Grund sollte dann die für die Erzeugung eines Erythems nötige Bestrahlung (MED) mit der Dicke der Hornschicht zunehmen, und zwar wegen des Absorptionsgesetzes mit exponentieller Abhängigkeit.

Diese Auffassung steht allerdings im Widerspruch zu Messungen von TRONNIER (58). Nach seiner Ansicht entsprechen die Unterschiede in der Größe der MED keineswegs dem Ausmaß, wie es bei einer reinen Filterwirkung zu erwarten wäre. Auch führt stufenweises Abtragen der Hornschicht nicht zu einer entsprechenden Zunahme der Erythembildung, vielmehr nimmt diese ab einem gewissen Abtragungsgrad der Hornschicht eher wieder ab. Dies führt TRONNIER zu der These, daß die Hornschicht weniger als Filter wirkt; vielmehr soll sie das Substrat darstellen, aus dem erythemwirksame Stoffe freigesetzt werden.

Die Arbeitsgruppe von SAYRE, OLSON und EVERETT veröffentlichte zahlreiche Untersuchungen über die UV-Empfindlichkeit der Haut (12, 38, 39, 46). Sie verwendeten einen lichtstarken Gittermonochromator mit einer 2500 W Xenon-Hochdrucklampe als Lichtquelle (SAYRE et al. (47)). Damit konnte ein kontinuierliches Spektrum hoher Intensität mit einer von der

Wellenlänge unabhängigen Bandbreite auf die Haut projiziert werden. SAYRE, OLSON und EVERETT fanden eine zu kurzen Wellenlängen stetig zunehmende Erythemempfindlichkeit (Abb. 21). Insbesondere lag die Erythemwirkungsfunktion bei 280 nm zwischen den Werten für 250 nm bzw. 300 nm. Es zeigte sich kein Minimum, allerdings war die Schwankungsbreite (zwischen den verschiedenen Versuchspersonen) bei 280 nm größer als bei den anderen Wellenlängen.

Die Angaben für die zur Erzeugung eines eben sichtbaren Erythems notwendige Bestrahlung (MED) schwanken beträchtlich. Als Beispiel seien hier die Werte genannt, die MAGNUS bzw. SAYRE, OLSON, EVERETT für die Wellenlänge 300 nm mit lichtstarken Monochromatoren ermittelt haben. MAGNUS (33) findet Extremwerte von $8,9 \text{ mWsec/cm}^2$ bis 120 mWsec/cm^2 bei 18 Versuchspersonen. SAYRE, OLSON und EVERETT (46) geben bei 30 Versuchspersonen Werte zwischen 12 mWsec/cm^2 und 45 mWsec/cm^2 an.

4. Die Auswahl geeigneter Wirkungsfunktionen

Bei den nachfolgend durchgeführten Messungen an UV-Strahlern soll neben der spektralen Bestrahlungsstärke auch rechnerisch die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke für Pigment- bzw. Erythembildung bestimmt werden.

Die oben dargestellten Erythemwirkungsfunktionen unterscheiden sich in ihrem Kurvenverlauf vor allem im Bereich kurzer Wellenlängen. Eigenartigerweise wurden die unterschiedlichen Meßergebnisse der verschiedenen Arbeitsgruppen bisher wenig beachtet, auch sind keine Untersuchungen zur endgültigen Klärung be-

kannt. Ebenso ist die Frage, inwieweit sich die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke eines UV-Strahlers ändert, wenn sein Spektrum mit der einen oder anderen Wirkungsfunktion bewertet wird, bisher noch nicht untersucht.

Bei den Berechnungen der Erythemwirksamkeit von UV-Strahlern wird daher im Rahmen dieser Arbeit neben einer Standard-Erythemkurve noch eine zweite zur Bewertung herangezogen. Als Standard-Erythemkurve wird die in der Vornorm DIN 5032 (Teil 10) angegebene Wirkungsfunktion gewählt; sie lag bereits in numerischen Werten vor und wurde direkt übernommen (Abb. 22, ERY 1). Der Wendepunkt und die Schulter bei etwa 280 nm sind durch Interpolation hervorgerufen, da die Wirkungsfunktion durch Eingabe von Werten für jeden zehnten Wellenlängenschritt errechnet wurde.

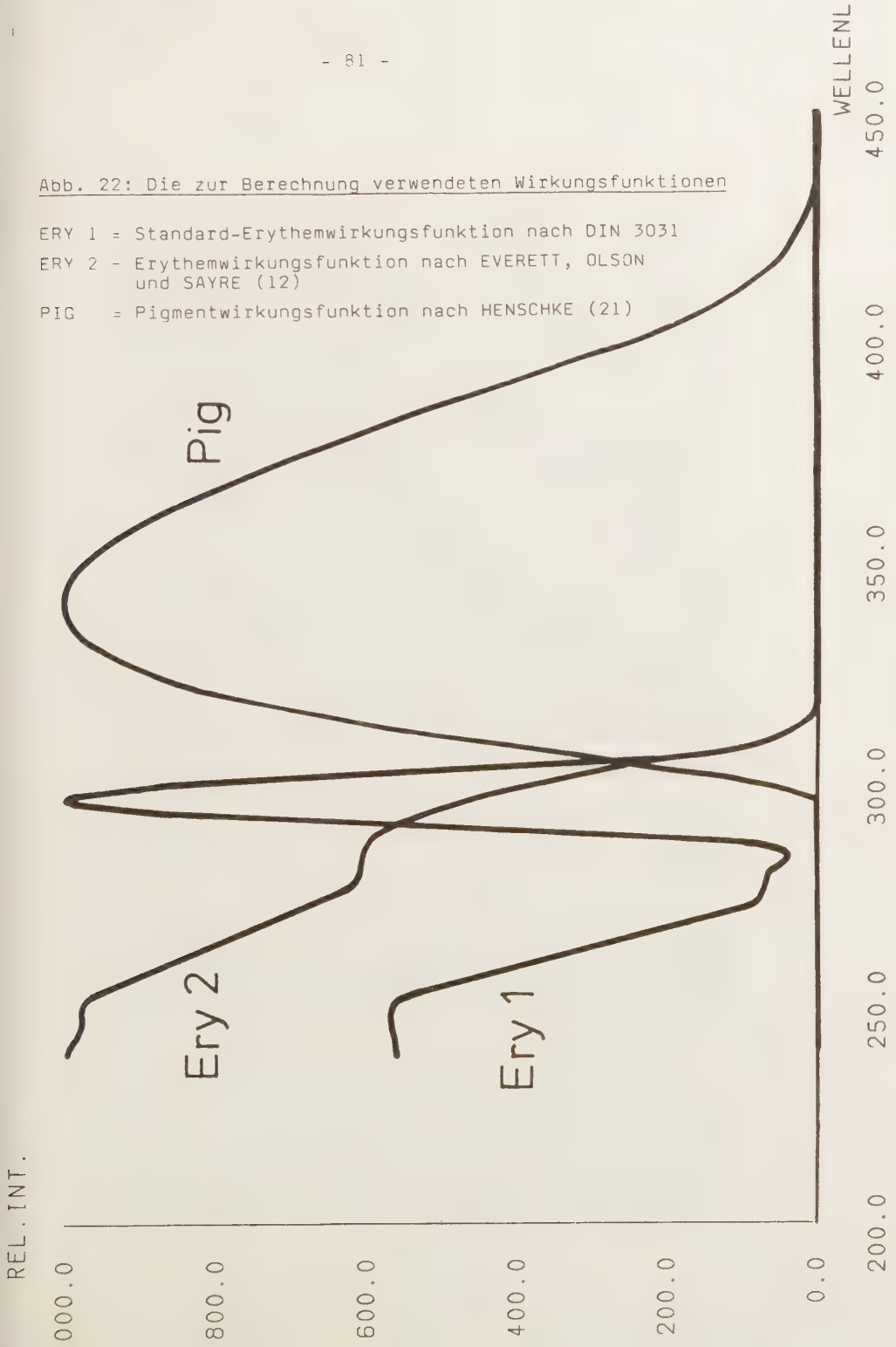
Bei der Wahl der weiteren Kurve wurde überlegt, ob eine Variation im langwelligen Anstieg einen merklichen Einfluß ausübt. Die Form und Lage des langwelligen Anstiegs hat große Bedeutung bei der Erythem-erzeugung mit Sonnenlicht, da infolge der Absorption der Atmosphäre praktisch die gesamte erythemwirksame UV-Strahlung auf diesen Bereich beschränkt ist. Bei Hg-Strahlern fallen nur die Linien 313 nm und 302 nm in diesen Wellenlängenbereich. Die Linie 313 nm liegt bereits im auslaufenden Teil der Wirkungsfunktion mit Werten unter 0,07 für alle vorgeschlagenen, verschiedenen Wirkungsfunktionen. Die Linie 302 nm liegt im steilen Anstieg, hier macht sich eine kleine Verschiebung folglich stark bemerkbar; die Werte liegen je nach Autor bei $0,6 \pm 25\%$. Die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke dürfte sich dadurch jedoch nicht so stark verändern, daß ein biologisch meßbarer Unter-

Abb. 22: Die zur Berechnung verwendeten Wirkungsfunktionen

ERY 1 = Standard-Erythemwirkungsfunktion nach DIN 3031

ERY 2 = Erythemwirkungsfunktion nach EVERETT, OLSON
und SAYRE (12)

PIG = Pigmentwirkungsfunktion nach HENSCHKE (21)



schied zu erwarten wäre. Außerdem ist die Lage und Form des langwelligen Anstiegs der Erythemempfindlichkeit durch Untersuchungen im Rahmen der "Sonnenbiologie" inzwischen relativ genau festgelegt, z. B. durch Untersuchungen von URBACH und BERGER (63), die einen logarithmischen Anstieg zwischen 325 und 300 nm fanden.

Im Gegensatz dazu sollten sich die biologisch wirksamen Bestrahlungsstärken deutlich unterscheiden bei Bewertung der Spektren einmal mit der Standard-Wirkungsfunktion nach DIN 5031, und zum anderen mit einer zu kurzen Wellenlängen stetig ansteigenden Wirkungsfunktion, wie sie SAYRE, OLSON und EVERETT angeben. Vor allem zwischen Strahlern mit verschieden großem UV-C-Anteil könnten sich Unterschiede in der biologisch wirksamen Bestrahlungsstärke in einem Ausmaß herausstellen, daß sie biologisch meßbar sein müßten und so vielleicht eine Entscheidung zu Gunsten der einen oder anderen Funktion zuließen. Die zweite Erythemwirkungsfunktion wurde daher aus den von SAYRE, OLSON und EVERETT (46) angegebenen Mittelwerten für die MED abgeleitet. Dabei wurde die Kurve leicht geglättet und von 250 nm nach 240 nm linear extrapoliert; sie ist in Abb. 22 als Kurve ERY 2 dargestellt.

Zur Ermittlung der pigmentwirksamen Bestrahlungsstärke wurde die oben (Abb. 18) dargestellte und in den DIN-Normen übernommene Wirkungsfunktion herangezogen (Abb. 22, FIG).

5. Einige Bemerkungen zur biologisch wirksamen Bestrahlungsstärke

Die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke wird rechnerisch durch Integration bzw. Summenbildung über alle Wellenlängen bestimmt (V. 1). Die oben angegebenen Wirkungsfunktionen sind punktweise, d. h. bei Bestrahlung mit einem kleinen Wellenlängenbereich gemessen. Um daraus die Wirkung einer Bestrahlung mit verschiedenen Wellenlängen durch Summation ermitteln zu können, muß gewährleistet sein, daß sich die Einzelbeträge aus verschiedenen Wellenlängenintervallen linear aufsummieren. Grundvoraussetzung für die Gültigkeit dieses sogenannten Additionstheorems ist, daß zumindest der letzte, für die Auslösung eines Erythems bzw. Pigments verantwortliche Schritt für alle Wellenlängen gleich ist. Das Additionstheorem wird für die Pigmentierung stillschweigend als erfüllt vorausgesetzt; für die Erythembildung wurde es bereits von ADAMS, BORNES und FORSYTHE (1) postuliert und z. B. von SAYRE, OLSON und EVERETT (46) experimentell verifiziert.

Die biologisch wirksame spektrale Bestrahlungsstärke ist eine "relative" Größe, denn sie entsteht durch Multiplikation der spektralen Bestrahlungsstärke mit der (relativen) spektralen Wirkungsfunktion. Da die Wirkungsfunktion als Verhältnisgröße dimensionslos ist, ist die Dimension der wirksamen Bestrahlungsstärke wie die der Bestrahlungsstärke Watt/cm^2 ; beide können daher im gleichen Diagramm dargestellt werden. Auch ein direkter Vergleich verschiedener UV-Strahler ist ohne weiteres möglich, da alle Werte mit derselben relativen Funktion gebildet wurden. Schwierigkeiten treten auf, wenn zwei verschiedene

Wirkungsfunktionen für die gleiche Wirkung, also z. B. zwei Erythemwirkungskurven, verwendet werden: Die Ergebnisse, die mit der einen Wirkungskurve gewonnen wurden, sind dann nicht vergleichbar mit den Werten, die mit der anderen Funktion errechnet wurden. Es ist also nicht zulässig, aus einem höheren Wert der mit der einen Wirkungsfunktion berechneten erythemwirksamen Bestrahlungsstärke zu schließen, daß die Strahlenquelle wirksamer und die zur Erzeugung eines Erythems nötige Zeit geringer sein müßte, wenn diese Wirkungsfunktion gültig wäre. Zur Bestimmung einer Verhältniszahl müßte nämlich zu jeder der beiden gewählten Erythemwirkungsfunktionen noch je ein absoluter Wert für die zur Bildung eines definierten Erythems nötige Bestrahlung bekannt sein. Die von verschiedenen Arbeitsgruppen bestimmten "Absolutwerte" hängen aber von so vielen Faktoren ab - wie etwa Bewertung eines minimalen Erythems, jahreszeitliche Schwankungen der Erythemempfindlichkeit, Kalibrierung der gesamten Apparatur, um nur die wichtigsten zu nennen - , daß ein direkter Vergleich wohl nicht zulässig ist.

Eine andere Möglichkeit bestünde darin, die Wirkungskurven so zu normieren, daß bei Bestrahlung mit einem Einheitsstrahler, d. h. mit konstanter spektraler Bestrahlungsstärke für alle Wellenlängen, die Erythemwirksamkeit für beide Wirkungskurven gleich wird. Allerdings gibt es keinen biologischen Grund für ein solches Vorgehen.

Unter der Annahme, daß die verschiedenen Kurvenformen im kurzwelligen Bereich bedingt sind durch eine unterschiedlich starke Absorption dieser Strahlung in der Hornhaut, wäre eine Anpassung der Wirkungsfunktion im langwelligen Bereich $> 300 \text{ nm}$ sinnvoll, wo die Ab-

sorption der Hornschicht gering ist. Division der DIN-Erythemwirkungskurve etwa durch den Faktor 2,0 führt zu einer Angleichung an die Kurve von SAYRE, OLSON und EVERETT für die Wellenlänge > 300 nm. Unter dieser Annahme wären dann durch Halbierung der mit Hilfe der DIN-Kurve errechneten wirksamen Bestrahlungsstärke auch direkte Vergleiche zwischen den Bewertungsfunktionen möglich. Vergleiche dieser Art wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

VII. Die Messung der Spektren und die Bestimmung einiger Kenndaten von UV-Strahlern

Mit Hilfe der oben beschriebenen Apparatur wurde die spektrale Bestrahlungsstärke einiger am Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie bzw. an der Klinik für Physikalische Medizin verwendeten UV-Strahler bestimmt. Aus diesen Spektren wurden mit der elektronischen Datenverarbeitung einige integrale Größen errechnet.

1. Die verwendeten UV-Strahlenquellen

Die untersuchten UV-Strahler waren kommerzielle Geräte, die von der Fa. HANAU Quarzlampen GmbH* hergestellt und vertrieben wurden:

Solarium HANAU 20 de Luxe:

Das Gerät ist zur hängenden Montage vorgesehen. Es enthält drei Quecksilberdampf-Hochdruckbrenner und zwei Infrarot-Strahler.

Durch die drei Hg-Brenner und geeignet geformte Reflektoren wird eine für Ganzkörperbestrahlung ausreichende Bestrahlungsfläche erreicht. Die Hg-Brenner sind nicht getrennt schaltbar.

Höhensonne HANAU 3020:

Die Höhensonne HANAU 3020 ist ein Standgerät. Sie enthält einen Hg-Hochdruckbrenner und zwei IR-Strahler, die als Vorwiderstände für den Hochdruckbrenner verwendet werden. Über den Hg-Brenner können zwei

* Original HANAU Quarzlampen GmbH, 6450 Hanau, Höhensonnenstraße

Filterzylinder aus Schwarzglas stufenlos geschoben werden, sodaß ein Teil des Hg-Brenners abgeschirmt wird und so der Anteil der ungefilterten Strahlung an der Gesamtstrahlung frei wählbar ist.

Höhensonnen HANAU 3030:

Die Höhensonne HANAU 3030 ist ein Standgerät mit zwei nebeneinander angeordneten gleichartigen Bestrahlungseinheiten zur Bestrahlung einer größeren Fläche. Es wurde die von einer Einheit abgegebene Dauerstrahlung gemessen.

Jede Einheit enthält zwei Hg-Brenner und je zwei zugehörige IR-Strahler als Vorwiderstand. Je ein Hg-Brenner ist mit einem nicht entfernbar Filterrohr umgeben und soll als reiner UV-A-Strahler wirken. Der zweite Hg-Brenner wird mit einem Vielfachen der zulässigen Dauerleistung betrieben. Er kann daher nur maximal 120 Sekunden eingeschaltet werden und gibt während dieser Zeit eine sehr intensive erythemwirksame UV-Strahlung ab ("Impulsbestrahlung"). Da dieser Brenner nur kurz eingeschaltet werden kann und während dieser Zeit kein Gleichgewichtszustand erreicht wird, wurde dessen Bestrahlungstärke nicht gemessen.

Hafi 500 HANAU:

Der UV-Strahler Hafi 500 ist ein Standgerät. Es enthält einen Hg-Hochdruckbrenner. Beim ausgemessenen Gerät sind die ursprünglich vorhandenen und als Vorwiderstand verwendeten IR-Strahler durch eine Drossel ersetzt. Über den Hg-Brenner können stufenlos zwei Glasfilterzylinder geschoben werden, um den Anteil der

ungefilterten Strahlung frei wählen zu können. Der Strahler Hafi 500 ist ein Vertreter der frühen Generation von Bestrahlungsgeräten.

2. Der Quecksilberdampf-Hochdruckbrenner und sein Spektrum

Der Quecksilberdampf-Hochdruckbrenner ist die am weitesten verbreitete UV-Strahlenquelle. Die Verwendung von Quecksilber bietet verschiedene Vorteile: Es hat ein günstig liegendes Linienspektrum, Quecksilberdampf ist chemisch wenig aggressiv, und der zur Anregung höherer Energieniveaus nötige hohe Dampfdruck wird bereits bei niederen Temperaturen erreicht. Während im Dampfdruckbereich über ein Torr vor allem die Resonanzlinie (185 nm) und die Singulett-Triplett-Interkombinationslinie (254 nm) abgestrahlt werden, treten bei der im Bereich 100 bis 10 000 Torr Hg-Dampfdruck betriebenen Hochdrucklampe eine Vielzahl von Linien und bereits ein schwaches Temperaturstrahler-Kontinuum der zentralen, heißen Bogenentladung auf.

Bei Inbetriebnahme des Brenners ist das Quecksilber noch flüssig und der Dampfdruck daher sehr niedrig. Zur Verbesserung des Zündverhaltens wird meist ein Edelgas (Argon) mit einem Druck von 10 bis 50 Torr zugefügt. Der Brenner zündet dadurch besser, weil die Edelgasfüllung zunächst die Stromleitung übernimmt. Nach Ablauf der Einbrennzeit (ca. fünf Minuten) ist das gesamte Quecksilber verdampft. In der eingebrannten Lampe trägt das Edelgas nicht zur Strahlungsemission bei, da die Anregungsspannung größer als die des Quecksilbers ist und außerdem der Dampfdruck im Vergleich zum Dampfdruck des Quecksilbers niedrig ist (Näheres bei ELENBAAS (11)).

Das Entladungsrohr wird wegen der großen Durchlässigkeit im UV-Bereich aus Quarzglas hergestellt. Reinstes Quarzmaterial hat seine Absorptionskante etwa bei 165 nm. Durch Beimischung von Zuschlagstoffen und natürlich vorkommende Verunreinigungen verschiebt sich die Absorptionskante zu längeren Wellenlängen. Dadurch wird die ozonerzeugende Strahlung der Resonanzlinie 185 nm vom Glaskolben absorbiert.

Die Abb. 23 zeigt ein UV-Spektrum eines Quecksilberdampf-Hochdruckstrahlers, wie es mit der gebauten Apparatur aufgenommen wurde. Die Wellenlängen der wichtigsten Linien sind angegeben. Die Linie 366 nm ist die stärkste UV-Linie, gefolgt von der Linie 313 nm; die relativen Intensitäten sind aus der Abb. 23 zu ersehen.

3. Die Durchführung der Messungen

Die UV-Lampen wurden entsprechend der Bedienungsanleitung installiert, die Bestrahlungsrichtung war vertikal. Die Eintrittsöffnung des Spektrometers befand sich mittig unter der Lampe, der Abstand betrug 100 cm ab Unterkante des Strahlers. Nach einer Einbrenndauer von zehn Minuten wurde die Einstellung des Spektrometers durchgeführt, anschließend wurde die spektrale Bestrahlungsstärke der UV-Strahlenquellen punktweise bestimmt und das Ergebnis auf Lochstreifen gespeichert. Bei den Strahlern mit zuschaltbarem Filtersystem (Hafi 500 und Höhensonne 3020) wurde das Spektrum einmal ohne Filter (Filtersystem ganz geöffnet) und zum anderen mit Filter (Filtersystem ganz geschlossen) bestimmt. Alle Messungen begannen bei der Wellenlänge 240 nm und wurden bei der mittleren Schrittweite durchgeführt.

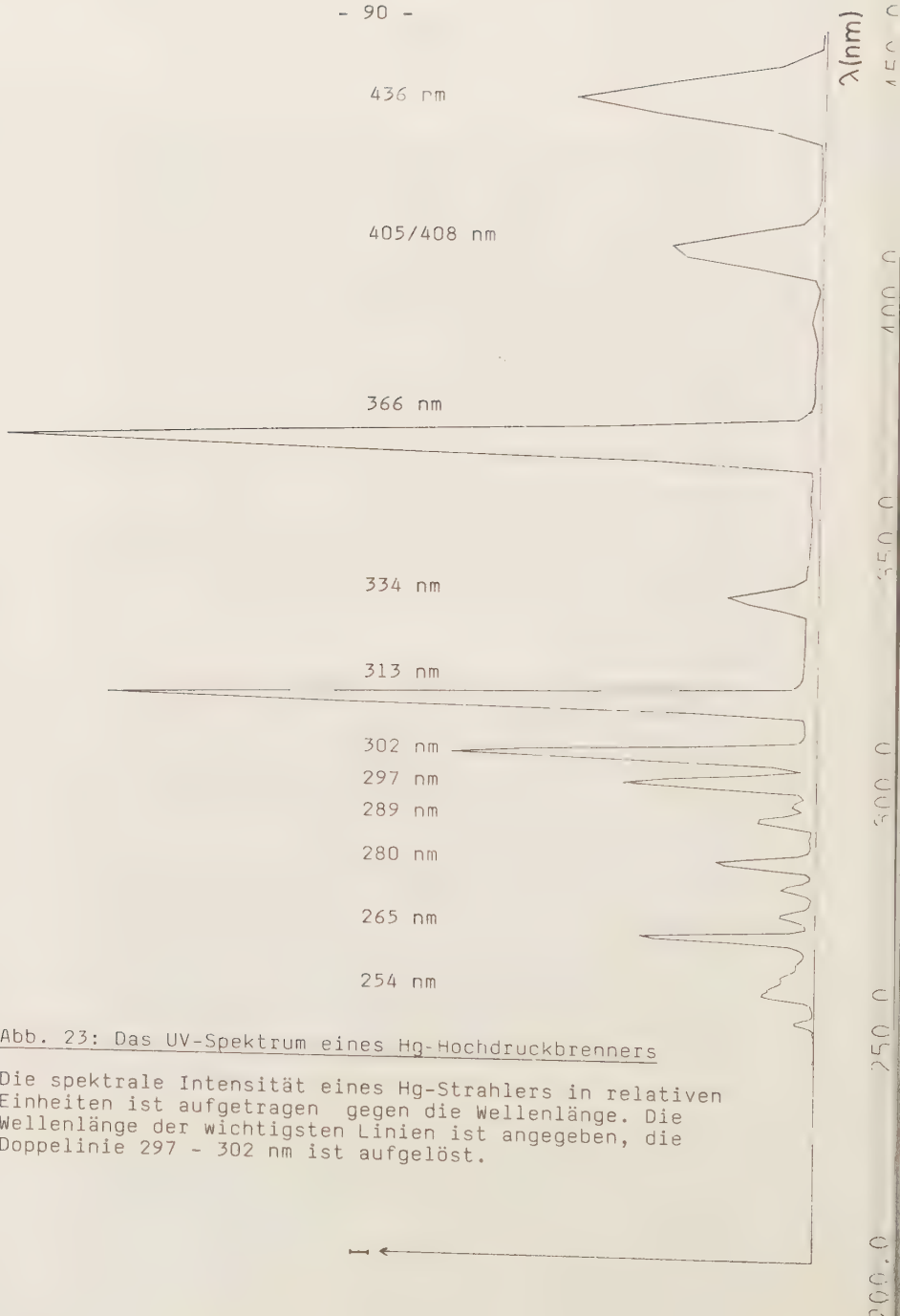


Abb. 23: Das UV-Spektrum eines Hg-Hochdruckbrenners

Die spektrale Intensität eines Hg-Strahlers in relativen Einheiten ist aufgetragen gegen die Wellenlänge. Die Wellenlänge der wichtigsten Linien ist angegeben, die Doppelinie 297 - 302 nm ist aufgelöst.

Die große Intensität der Linie 366 nm zwingt zu relativ niedriger Einstellung der Empfindlichkeit; dies führt - vor allem bei gefilterter Strahlung - zu relativ kleinen Meßwerten im Bereich kleiner Wellenlängen. Daher wurden für jede Spektralverteilung je zwei Messungen durchgeführt: Zuerst wurde mit verminderter Empfindlichkeit das gesamte Spektrum von 240 nm bis 450 nm aufgezeichnet. Sodann wurde mit veränderter Empfindlichkeitseinstellung der erythemwirksame und intensitätsschwache Spektralbereich von 240 nm bis 340 nm registriert. Durch diese Doppelmessung war auch eine zusätzliche Kontrolle für etwaige Bedienungsfehler gegeben.

Hier nochmals zusammenfassend einige Einstellwerte:

- Meßentfernung 100 cm
- Eintrittsöffnung 2,5 cm oder 0,56 cm Durchmesser
- Spaltweite 0,5 mm
- Photomultiplierspannung 1000 V
- Digitalvoltmeter-Einstellung 200 mV
- Empfindlichkeitseinstellung 20 K Ω m bis 250 K Ω m
- Schrittweite: mittlere Geschwindigkeit, entsprechend dem mittleren Übersetzungsverhältnis des Getriebes

4. Die Spektren - Meßergebnisse und abgeleitete Größen

Die auf Lochstreifen gespeicherten Meßergebnisse wurden mit Hilfe der oben beschriebenen Programmschritte aufgearbeitet. Numerisch bestimmt wurden die Bestrahlungsstärken im UV-A, UV-B und UV-C Bereich. Mit Hilfe der relativen biologischen Wirkungsfunktionen wurde die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke errechnet. Als Wirkungsfunktionen wurden die in der DIN-Norm vorgeschlagenen Kurven für Erythem- bzw. Pigmentbildung sowie die von SAYRE, OLSON und EVERETT (46) vorge-

schlagene Variation mit nach kurzen Wellenlängen stetig ansteigenden Werten verwendet (Abb. 22). Die Ergebnisse sind in Wertetabellen (Tab. 2-3) sowie in Abbildungen (Abb. 24-29) als Bestrahlungsstärke (Absolutwerte) in Abhängigkeit von der Wellenlänge mit und ohne Bewertungsfunktion dargestellt. Die Intensitätsverteilung aller Lampen zeigt das typische Linienspektrum eines Hg-Brenners. Die Linien 366 nm und 313 nm haben die größte Intensität, die kontinuierliche Strahlung zwischen den Linien ist zum Teil vernachlässigbar klein. Die relative Intensität der einzelnen Linien wird vor allem durch die Absorptionseigenschaften des zur Herstellung des Quarzbrenners verwendeten Glases bestimmt. Diese wiederum hängen vor allem von den bei der Herstellung in geringen Mengen beigegebenen Zuschlagstoffen ab: durch geeignete Beimengung läßt sich das Rohspektrum in weiten Grenzen dem gewünschten Verlauf annähern.

Tab. 2: Die Bestrahlungsstärke in $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ bei 100 cm Bestrahlungsabstand

	<u>Hafi 500</u>		<u>Hanau 3020</u>		<u>Hanau 3030</u>	<u>Solarium</u>
	ohne Filter	mit Filter	ohne Filter	mit Filter		
UV-ABC	1947	950	1885	63,1	430	1297
UV-A	$\frac{1150}{59,1\%}$	$\frac{871}{91,7\%}$	$\frac{948}{50,3\%}$	$\frac{33,1}{52,5\%}$	$\frac{403}{93,6\%}$	$\frac{768}{60\%}$
UV-B	$\frac{596}{30,6\%}$	$\frac{62}{6,5\%}$	$\frac{751}{39,8\%}$	$\frac{24,5}{38,8\%}$	$\frac{25}{5,8\%}$	$\frac{499}{39\%}$
UV-C	$\frac{201}{10,3\%}$	$\frac{17,1}{1,8\%}$	$\frac{186}{9,9\%}$	$\frac{5,5}{8,7\%}$	$\frac{2,5}{0,6\%}$	$\frac{12}{0,9\%}$
<u>UV-A</u> <u>UV-B+UV-C</u>	1,44	11,0	1	1,1	14,7	1,5
<u>UV-B</u> <u>UV-C</u>	3,00	3,5	4	4,5	10,0	42,0
PIGSUM	1179,0	758,0	1069,0	36,2	350,0	822,0
ERYSUM 1	245,0	21,0	281,0	9,0	4,4	134,0
ERYSUM 2	281,0	24,5	295,0	9,3	4,4	85,0
<u>PIGSUM</u> <u>ERYSUM 1</u>	4,8	36,0	3,8	4,0	80,0	6,1

(10 bei ERYSUM 2)

Die Relativprozentage sind auf die Gesamt-UV-Strahlung bezogen

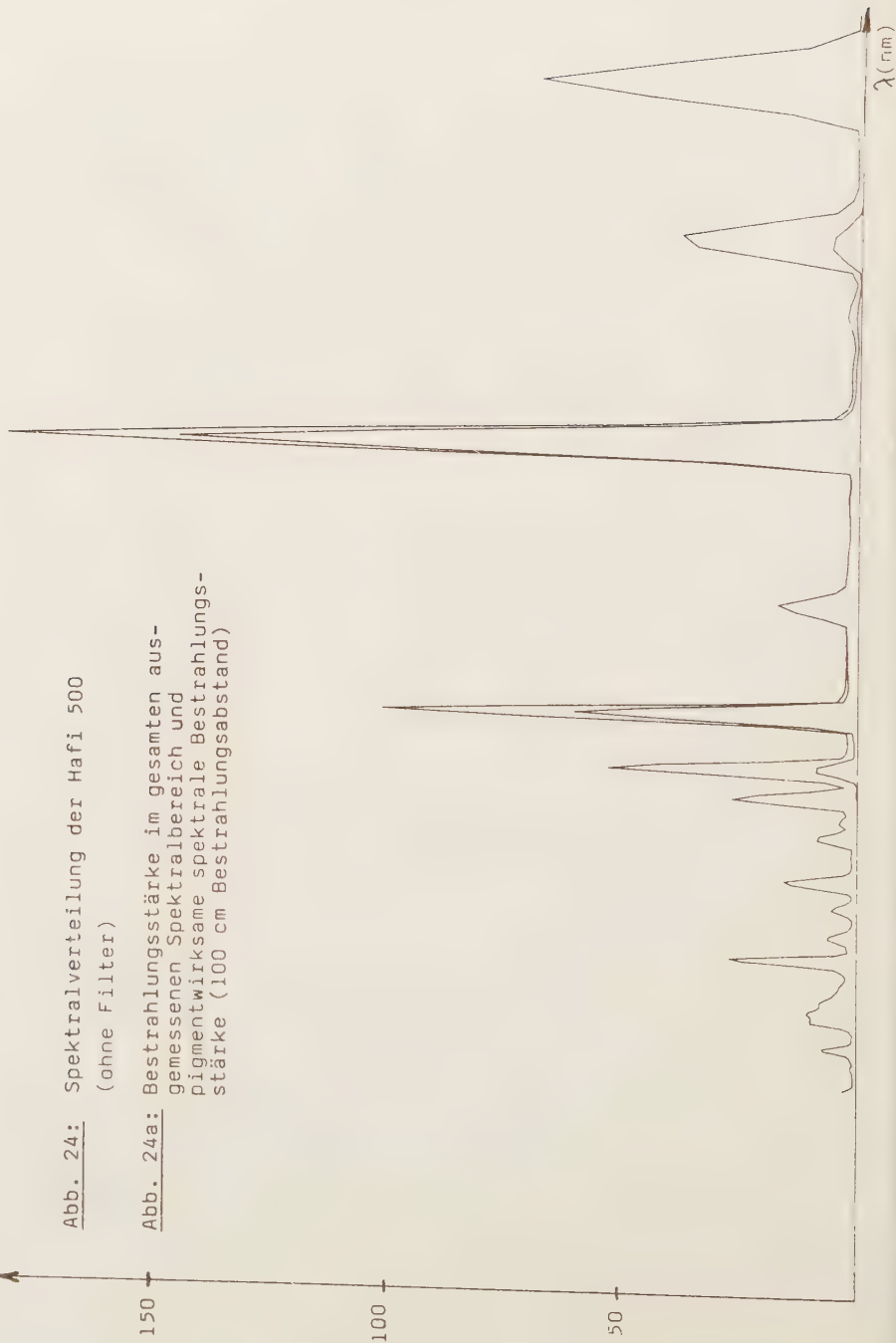
I ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

Abb. 24: Spektralverteilung der Hafi 500

(ohne Filter)

Abb. 24a: Bestrahlungsstärke im gesamten ausgemessenen Spektralbereich und pigmentwirksame spektrale Bestrahlungsstärke (100 cm Bestrahlungsabstand)

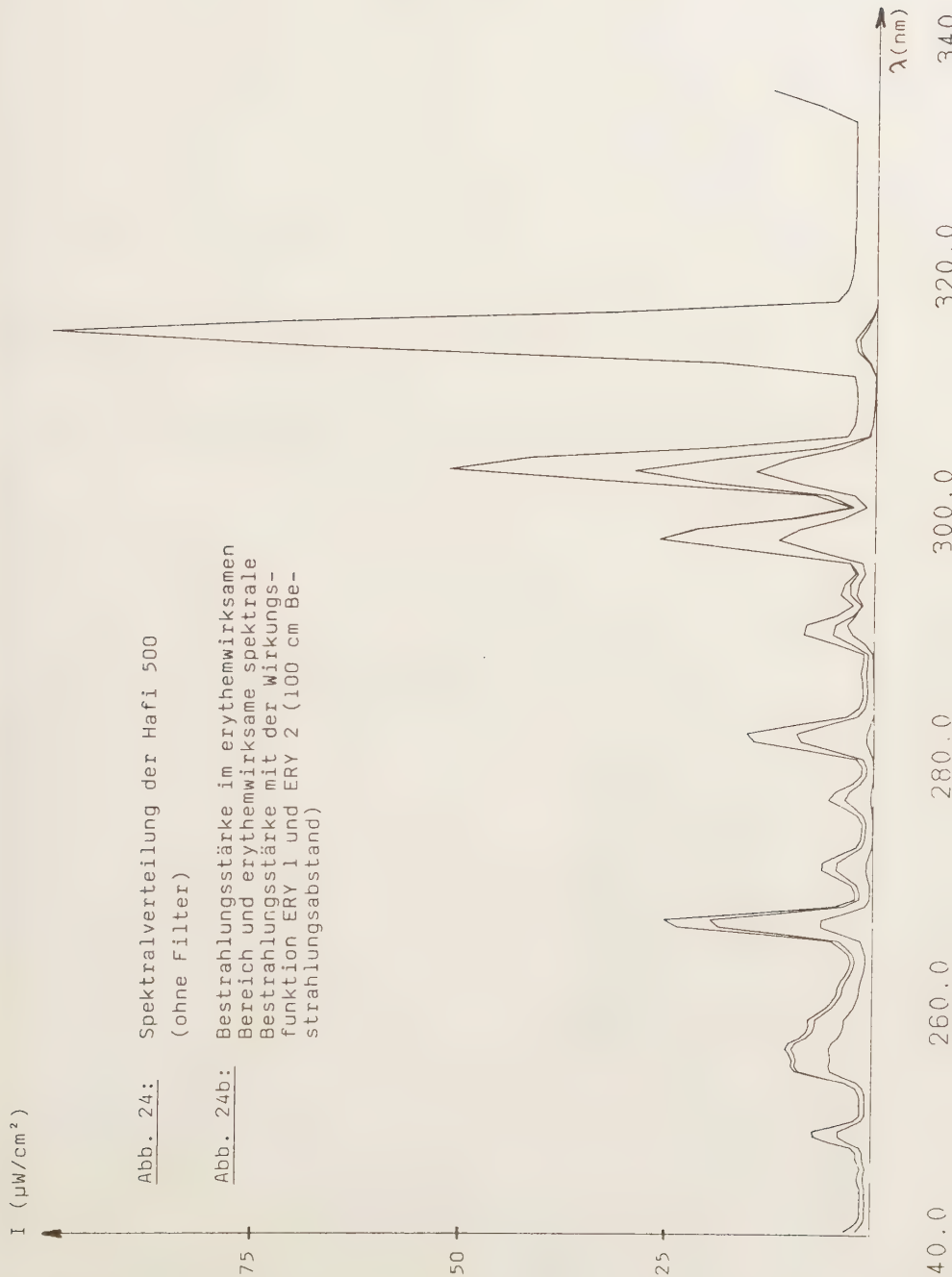


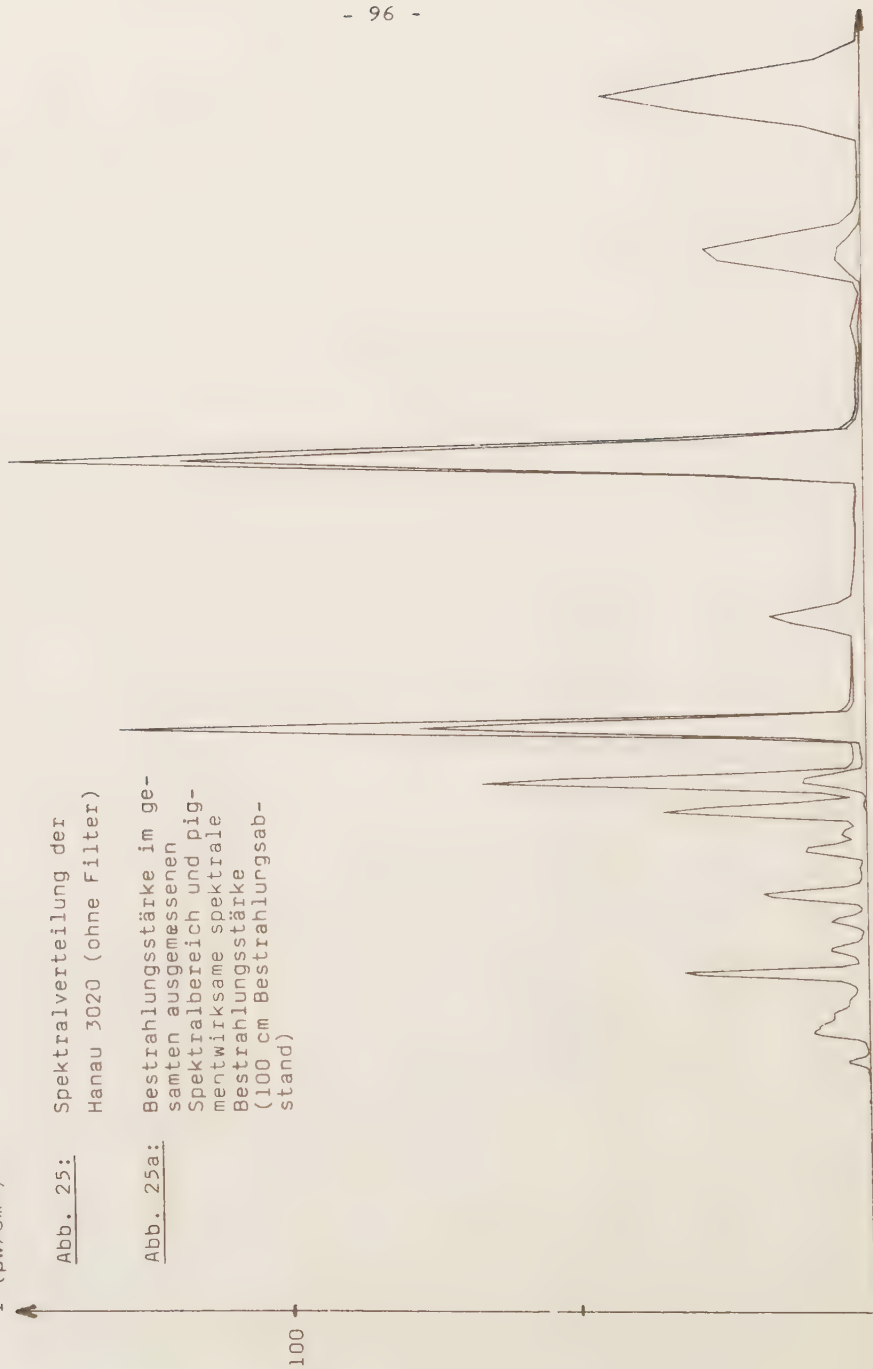
Abb. 24: Spektralverteilung der Hafsi 500
(ohne Filter)

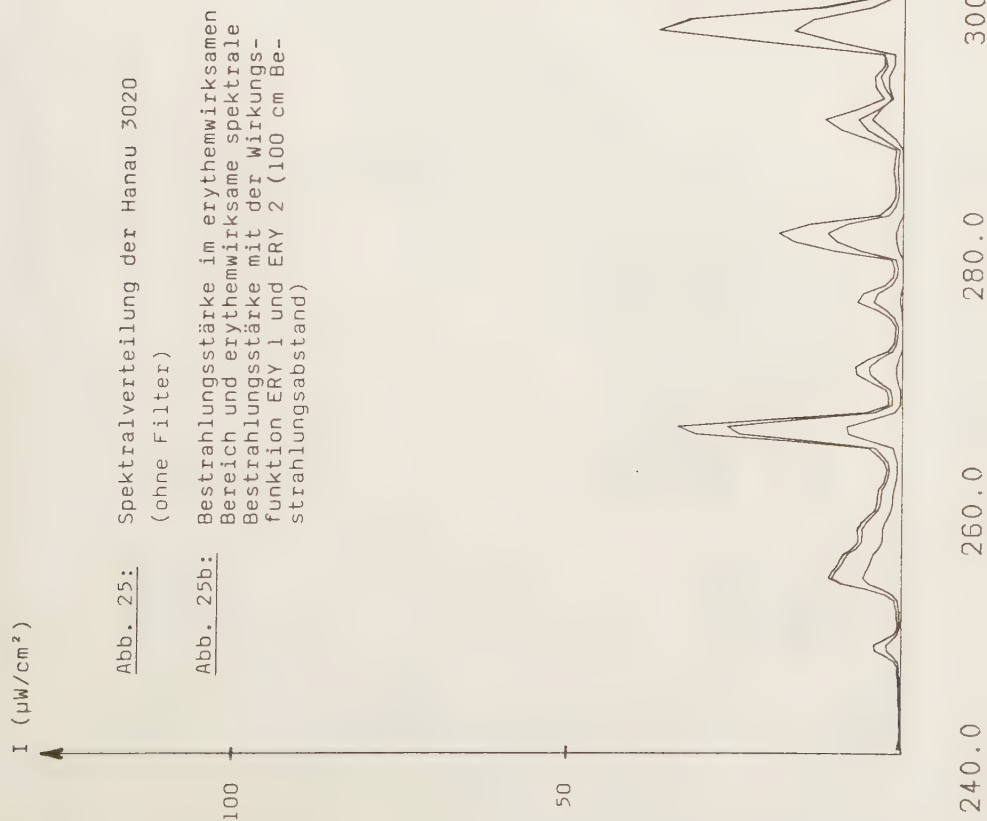
Abb. 24b: Bestrahlungsstärke im erythemwirksamen Bereich und erythemwirksame spektrale Bestrahlungsstärke mit der Wirkungsfunktion ERY 1 und ERY 2 (100 cm Bestrahlungsabstand)

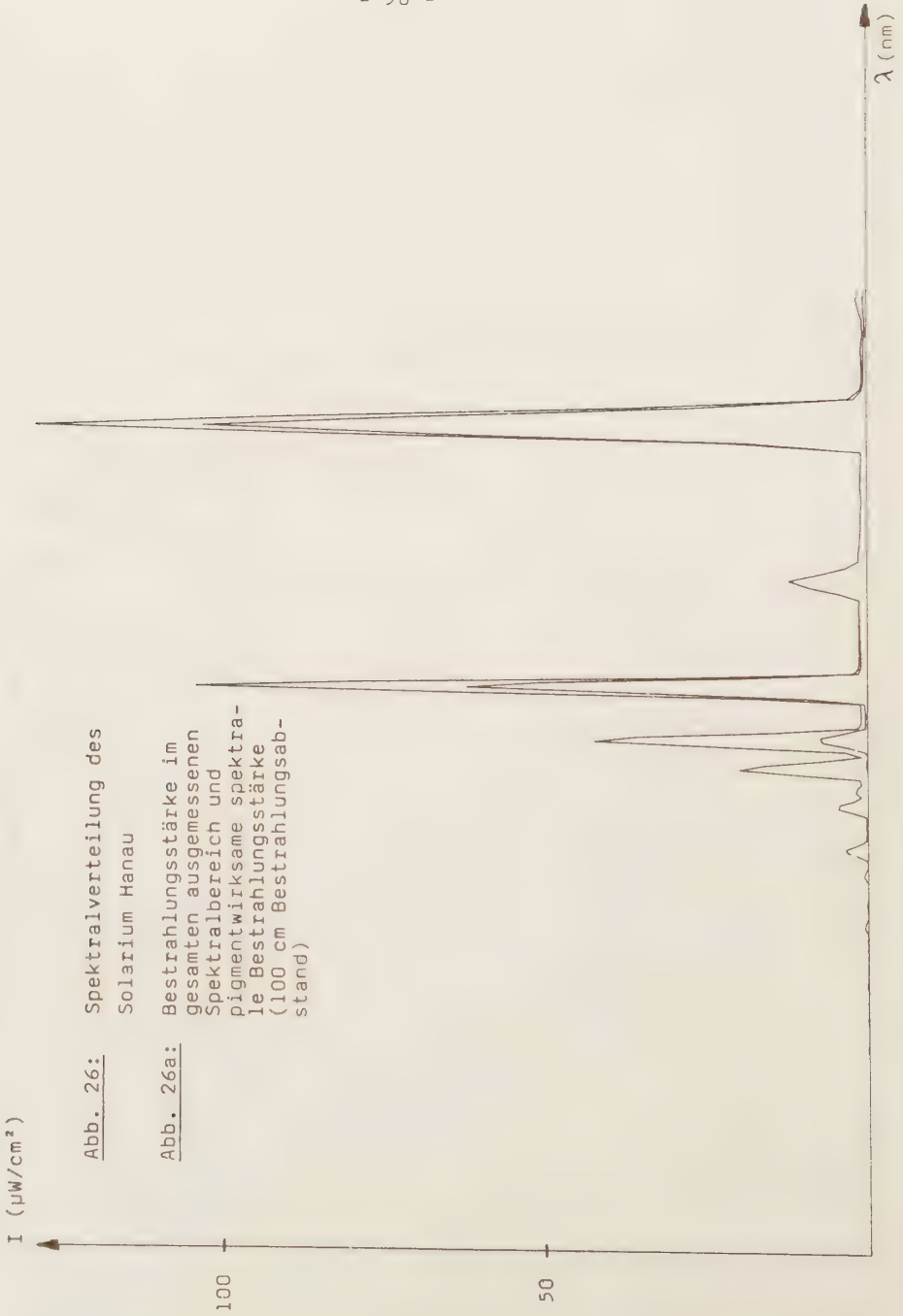
I ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

Abb. 25: Spektralverteilung der
Hanau 3020 (ohne Filter)

Abb. 25a: Bestrahlungsstärke im gesamten ausgemessenen Spektralbereich und pigmentwirksame spektrale Bestrahlungsstärke (100 cm Bestrahlungsabstand)

 λ (nm)





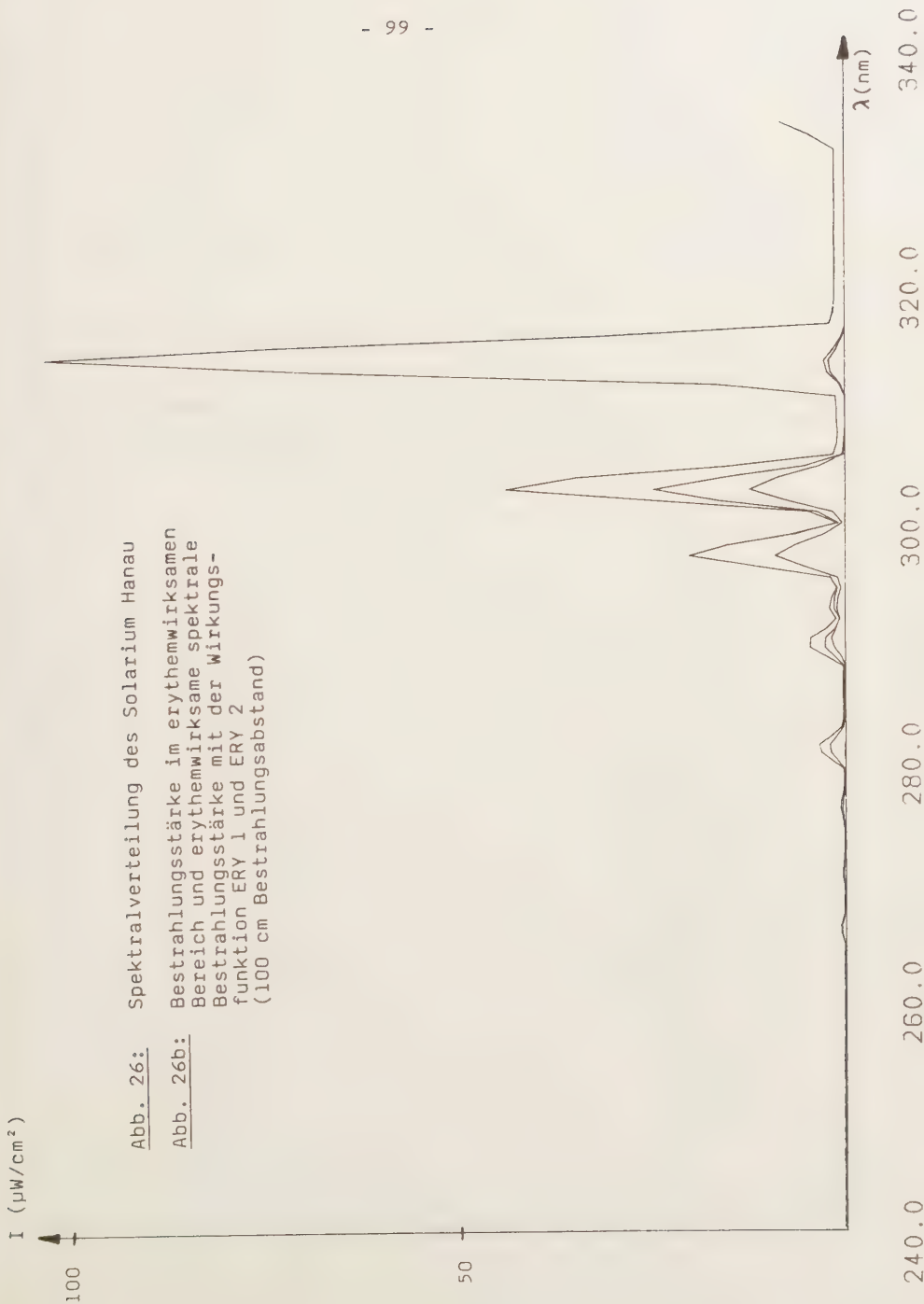


Abb. 26: Spektralverteilung des Solarium Hanau

Bestrahlungsstärke im erythemwirksamen
Bereich und erythemwirksame spektrale
Bestrahlungsstärke mit der Wirkungs-
funktion ERY 1 und ERY 2
(100 cm Bestrahlungsabstand)

Abb. 26b:

KL/11/75

IMB+KM

I ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

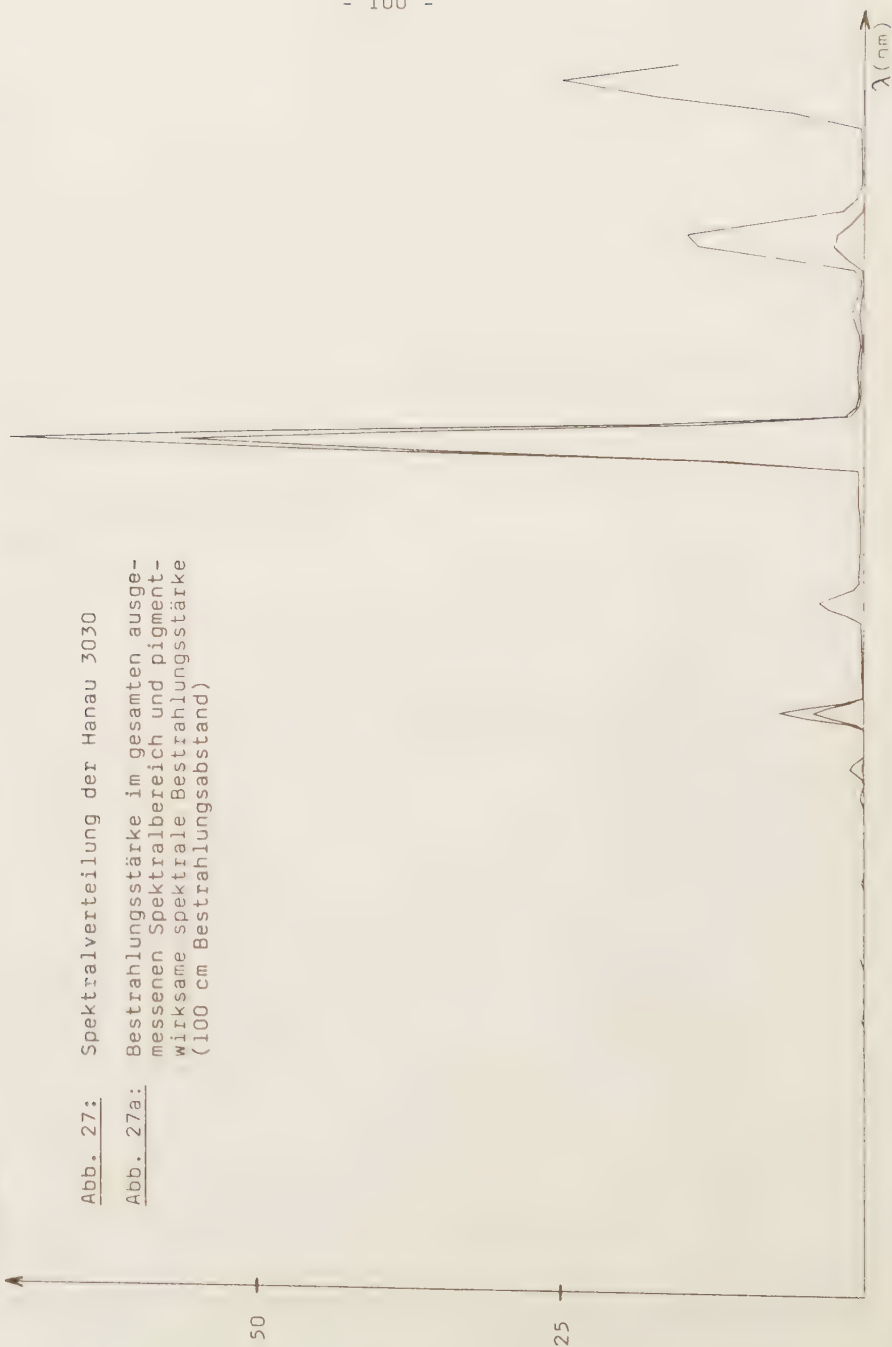


Abb. 27: Spektralverteilung der Hanau 3030

Abb. 27a: Bestrahlungsstärke im gesamten ausgemessenen Spektralbereich und pigmentwirksame spektrale Bestrahlungsstärke (100 cm Bestrahlungsabstand)

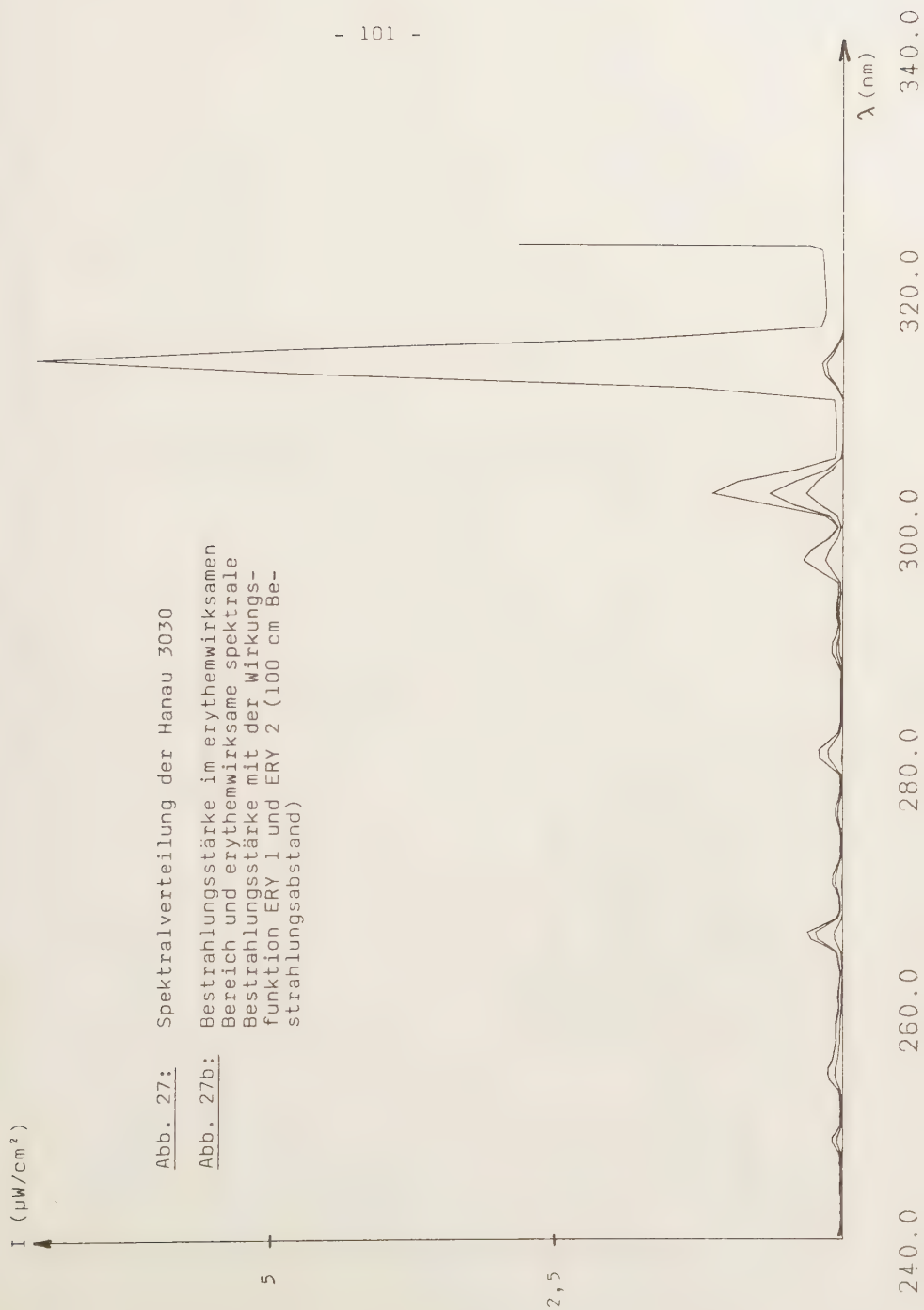


Abb. 27: Spektralverteilung der Hanau 3030

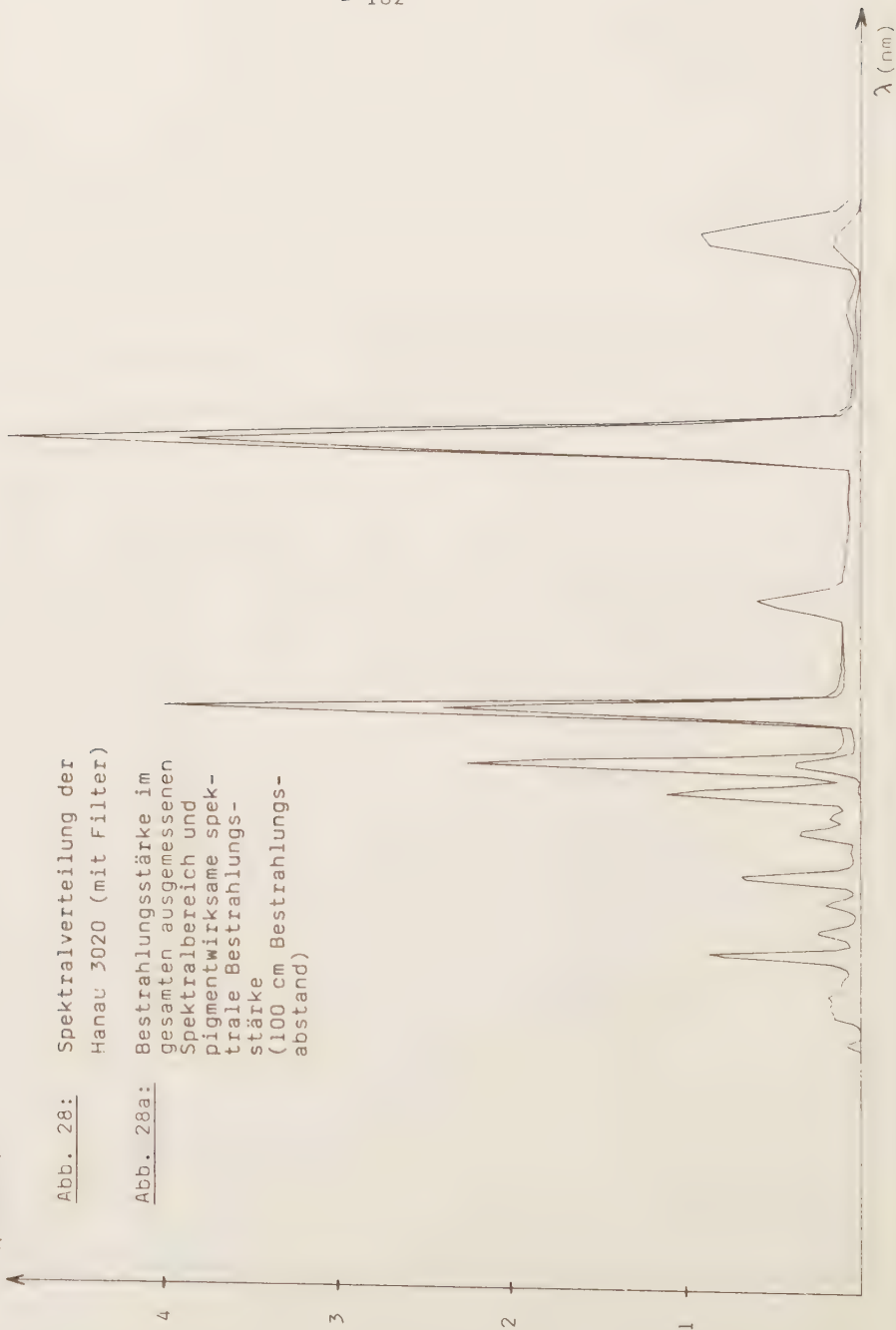
Abb. 27b: Bestrahlungsstärke im erythemwirksamen Bereich und erythemwirksame spektrale Bestrahlungsstärke mit der Wirkungsfunktion ERY 1 und ERY 2 (100 cm Bestrahlungsabstand)

I ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)Abb. 28:

Spektralverteilung der
Hanau 3020 (mit Filter)

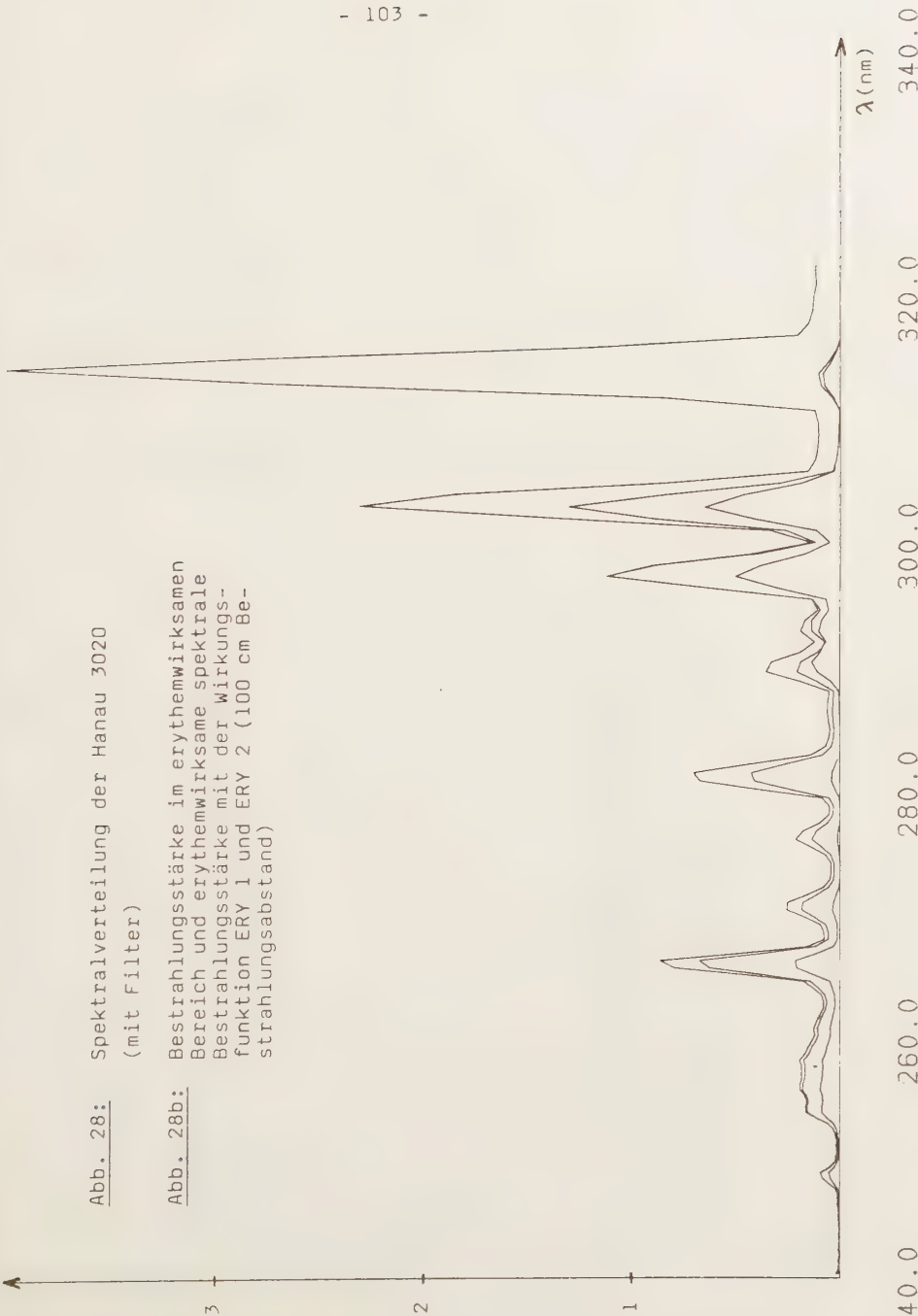
Abb. 28a:

Bestrahlungsstärke im
gesamten ausgemessenen
Spektralbereich und
pigmentwirksame spek-
trale Bestrahlungs-
stärke
(100 cm Bestrahlungs-
abstand)



I ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

- Abb. 28: Spektralverteilung der Hanau 3020
(mit Filter)
- Abb. 28b: Bestrahlungsstärke im erythemwirksamen
Bereich und erythemwirksame spektrale
Bestrahlungsstärke mit der Wirkungs-
funktion ERY 1 und ERY 2 (100 cm Be-
strahlungsabstand)

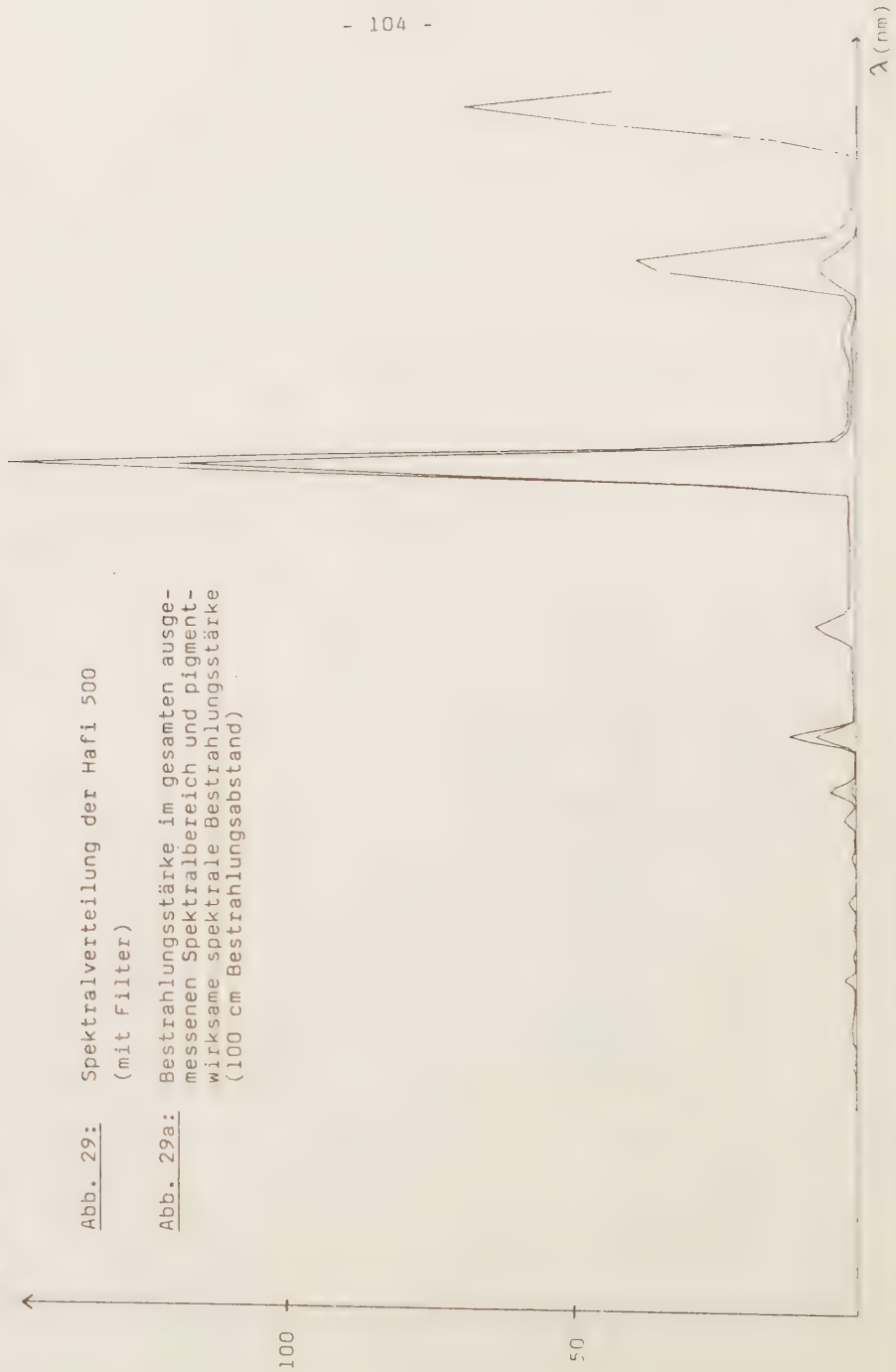


λ (nm)

240.0 260.0 280.0 300.0 320.0 340.0

$I \text{ (}\mu\text{W/cm}^2\text{)}$ Abb. 29:Spektralverteilung der Hafi 500
(mit Filter)Abb. 29a:

Bestrahlungsstärke im gesamten ausgemessenen Spektralbereich und pigmentwirksame spektrale Bestrahlungsstärke (100 cm Bestrahlungsabstand)



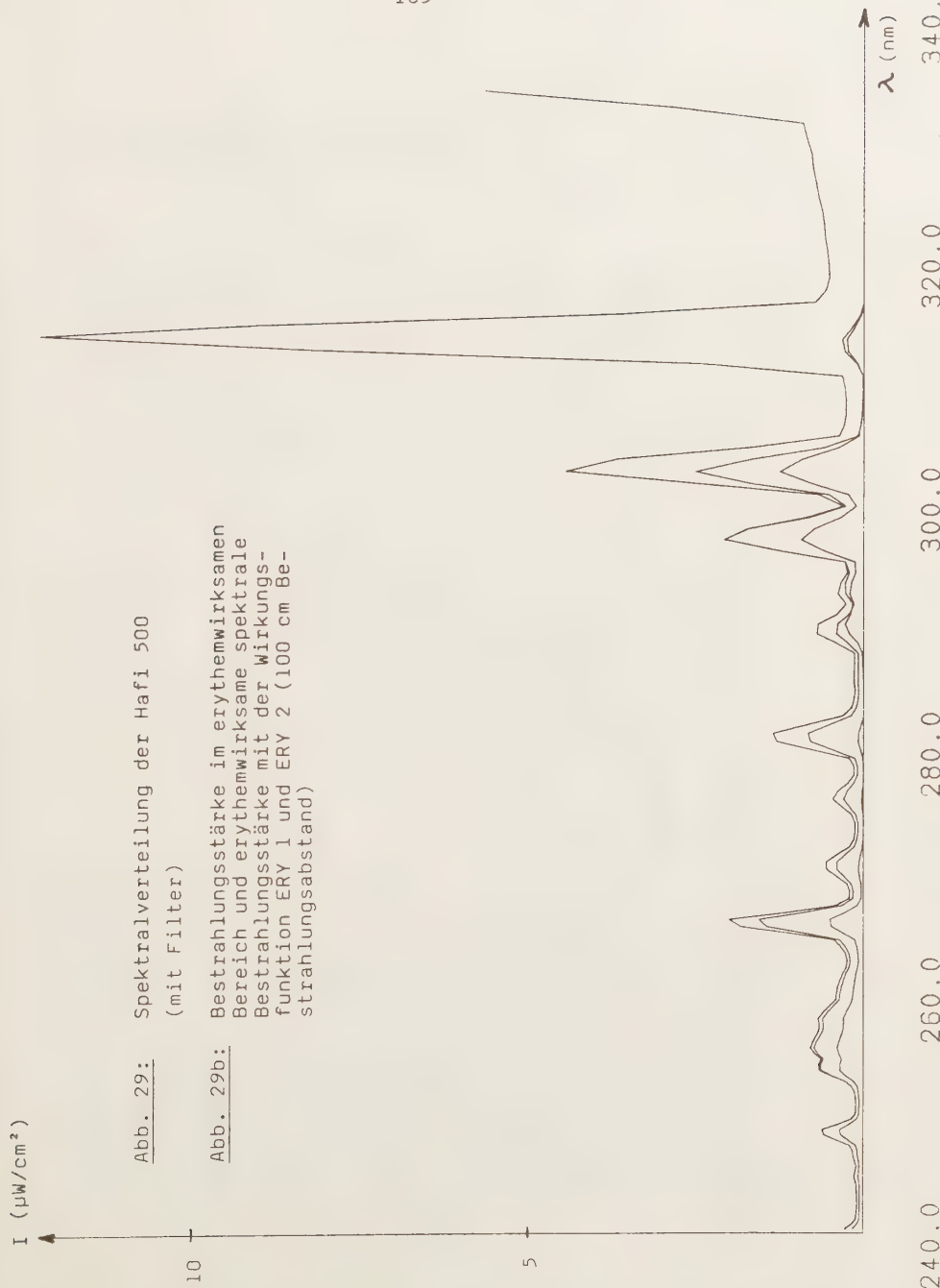


Abb. 29: Spektralverteilung der Hafi 500
(mit Filter)

Abb. 29b: Bestrahlungsstärke im erythemwirksamen
Bereich und erythemwirksame spektrale
Bestrahlungsstärke mit der Wirkungs-
funktion ERY 1 und ERY 2 (100 cm Be-
strahlungsabstand)

Tab. 3: Die Wirkung der Filter

Die Bestrahlungsstärken in den UV-Bereichen, die erythem- bzw. pigmentwirksame Bestrahlungsstärke und die Transmission des Filters im entsprechenden Bereich sind für die Hanau 3020 und die Hafi 500 angegeben (in $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ bzw. Prozent).

Hanau 3020

	ohne Filter	mit Filter	Transmission	ohne Filter	mit Filter	Transmission
--	-------------	------------	--------------	-------------	------------	--------------

UV-ABC

1885

63,0

3,34%

1947

950,0

48,0%

UV-A

948

33,0

3,48%

1150

871,0

75,7%

UV-B

751

24,5

3,26%

596

62,0

10,4%

UV-C

186

5,5

2,96%

201

17,1

8,5%

PIGSUM

1069

36,2

3,39%

1179

758,0

64,3%

ERYSUM 1

281

9,0

3,20%

245

21,0

48,6%

ERYSUM 2

295

9,3

3,15%

281

24,5

8,7%

5. Diskussion der Spektralverteilung der einzelnen Strahlenquellen

5.1. Hafi 500 HANAU (Abb. 24)

Der Strahler Hafi 500 HANAU ist ein Vertreter der älteren Generation von UV-Quellen. Mit einer Bestrahlungsstärke von $1947 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ist er der stärkste der gemessenen UV-Quellen. Der Anteil an UV-C ist mit $201 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, entsprechend 10,3% der gesamten UV-Strahlung, relativ hoch. Das Verhältnis von UV-A : UV-B : UV-C ist mit 60 : 30 : 10 typisch für UV-Lampen älterer Bauart.

Die Hafi 500 HANAU gibt auch unterhalb 240 nm nicht zu vernachlässigende Strahlung ab. Ihr Anteil wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgemessen, da für den Bereich $< 240 \text{ nm}$ keine Eichkurve bestimmt wurde. Wegen der unerwünschten Wirkungen der kurzwelligen und damit sehr energiereichen Strahlung wird die Hafi 500 HANAU für den medizinischen Einsatz nur in Spezialfällen verwendet.

5.2. HANAU 3020 (Abb. 25)

Die Höhensonne HANAU 3020 erreicht mit einer Gesamtbestrahlungsstärke von $1885 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ fast die Leistung der Hafi 500. Auch hier liegt der Anteil des UV-C bei etwa 10%, der UV-B-Anteil ist jedoch um über 30% gegenüber der Hafi 500 angehoben, dadurch sinkt der UV-A-Anteil auf etwa 50%. Es ergibt sich ein Verhältnis von UV-A : UV-B : UV-C von 50 : 40 : 10. Da das UV-B für einen Großteil der medizinisch-biologisch erwünschten UV-Wirkung verantwortlich gemacht

wird, ergibt sich damit eine Verbesserung der Effektivität ohne Zunahme der eher durch UV-C hervorgerufenen negativen Wirkungen.

5.3. Solarium HANAU de Luxe (Abb. 26)

Das Solarium HANAU de Luxe ergibt eine Gesamt-UV-Bestrahlung von $1297 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Es findet sich eine auffällige spektrale Verteilung. Die Hg-Linien 366 nm und 313 nm sind sehr intensiv, unter 300 nm fällt die Intensität sehr rasch. Entsprechend ergibt sich ein hoher UV-A- und UV-B-Anteil an der Gesamtstrahlung, der UV-C-Anteil liegt unter 1%. Es errechnet sich ein Verhältnis von UV-A : UV-B : UV-C gleich 60 : 39 : 0,9; UV-B : UV-C ergibt den Wert 42: ein Wert, der von keiner der anderen Strahlenquellen auch nur annähernd erreicht wird.

Das Solarium ist offensichtlich mit dem Ziel einer möglichst geringen UV-C-Strahlung bei hoher UV-A- und UV-B-Strahlung entwickelt worden. Dies soll die mutagen-cancerogene Wirkung des UV-C-Anteils bei wiederholtem Einsatz zu Bräunungszwecken niedrig halten.

5.4. HANAU 3030 (Abb. 27)

Der ausgemessene Brenner der Höhensonne HANAU 3030 ist mit einem nicht entfernbaren Quarzglasfilterrohr zur Absorption der kurzwelligen UV-Strahlung versehen. Entsprechend hoch ist der Anteil an UV-A an der Gesamtbestrahlung von $430 \mu\text{W}/\text{cm}^2$: er beträgt mit $403 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ etwa 94%. Die Höhensonne HANAU 3030 hat von den untersuchten Strahlern die niedrigsten absoluten und relativen Werte an UV-C. Das Verhältnis

UV-A : UV-B : UV-C ist mit 93,6 : 5,8 : 0,6 sehr hoch; der UV-B/UV-C Quotient liegt bei 10.

Die Höhensonne HANAU 3030 ist (im Dauerbetrieb) als UV-A-Strahler zu bezeichnen.

5.5. Der Einfluß der zuschaltbaren Filter

Die Lichtquellen Hafi 500 HANAU und HANAU 3020 sind mit zuschaltbaren Filtersystemen versehen. Die Tab. 3 stellt die Intensitäten mit und ohne Filter in den Wellenlängenbereichen und die daraus errechnete Durchlässigkeit des Filtersystems dar, die Abb. 28 und 29 zeigen die mit Filter gemessenen Spektren.

Das Filter der HANAU 3020 schwächt die UV-Strahlung auf etwa 3%. Dabei wird UV-A nur unwesentlich besser durchgelassen als UV-B oder UV-C, das Filter absorbiert im UV-Bereich fast konstant (geringfügiger Anstieg der Absorption zu kurzen Wellenlängen hin). Damit wird auch die Zusammensetzung, d. h. die Qualität der Strahlung nicht verändert. Das Filter kann somit nur zum Abblenden der Quarzlampe in kurzen Bestrahlungspausen verwendet werden, um ein Abschalten und die anschließende Abkühlungsphase zu vermeiden.

Das Filtersystem der Hafi 500 HANAU verändert dagegen die Qualität der Strahlung, die Gesamtintensität sinkt etwa auf die Hälfte. Der langwellige UV-A-Anteil wird zu 75% durchgelassen, UV-B und UV-C zu 90% absorbiert. Die Abb. 29 zeigt die spektrale Bestrahlungsstärke mit und ohne Filter. Die Linie 366 nm ist noch relativ wenig geschwächt, die Linie 313 nm wird bereits deutlich absorbiert. Die stärkere Absorption im kurzwelligen Bereich führt zur Veränderung des Verhältnisses UV-A : UV-B : UV-C von 60 : 30 : 10 ohne Filter

in 92 : 6,5 : 2 mit Filter. Die Hafi 500 HANAU wird mit Filter zu einem Überwiegenden UV-A-Strahler.

5.6. Die pigmentwirksame Bestrahlungsstärke

Multipliziert man die (spektrale) Bestrahlungsstärke mit der oben angegebenen Wirkungsfunktion für die direkte Pigmentierung (Abb. 22), erhält man die pigmentwirksame (spektrale) Bestrahlungsstärke. Sie ist in Abb. 24a-29a für jeden Strahler dargestellt. Die durch Integration über alle Wellenlängen erhaltene pigmentwirksame Bestrahlungsstärke als Maß für die Fähigkeit eines Strahlers zur direkten Pigmentierung ist in Tab. 2 zu sehen: Die pigmentwirksame Bestrahlungsstärke stimmt in guter Näherung mit den Werten für UV-A überein. Das Verhältnis von pigmenterzeugender zu erythemerzeugender Bestrahlungsstärke ist ebenfalls angegeben, es liegt bei einem Wert von etwa 5; lediglich bei den UV-A-Strahlern Hafi 500 HANAU mit Filter und HANAU 3030 ergibt sich ein Verhältnis von 36 bzw. 80.

Es ist interessant, die zu einer gerade sichtbaren Pigmentierung führende Zeit zu bestimmen. Nimmt man die in Abschnitt V.2 angegebene Schwellendosis von 10 Wsec/cm^2 für eine eben sichtbare Pigmentierung, so benötigt man mit dem UV-A-Strahler HANAU 3030 bei 100 cm Bestrahlungsabstand etwa acht Stunden, bis die Schwellendosis erreicht ist. Eine analoge Berechnung ergibt, daß die Erythemschwelle trotz des großen Verhältnisses von pigmenterzeugender zu erythemerzeugender Strahlung in etwa 100 Minuten erreicht wird, d. h. es tritt ein Erythem lange vor der direkten Pigmentierung auf.

Setzt man eine Erythemschwellendosis von 25 mWsec/cm^2 an, ergibt sich, daß zur Erzeugung einer eben sichtbaren Pigmentierung die 400fache Dosis nötig ist, die zu einem Erythem führt. Mit anderen Worten, nur Strahler mit einem Verhältnis der pigmenterzeugenden zur erythemerzeugenden Strahlung von deutlich über 400 können eine Pigmentierung ohne Erythembildung erwarten lassen. Die Höhensonne HANAU 3030 lag mit einem Wert von 80 weit unter diesem Wert, abgesehen davon, daß die Intensität für eine akzeptable Bestrahlungsdauer um eine Größenordnung zu klein ist.

5.7. Die erythemwirksame Bestrahlungsstärke

Mit Hilfe der in VI.4 angegebenen und in Abb. 22 dargestellten beiden Erythemwirkungsfunktionen wurde die spektrale erythemwirksame Bestrahlungsstärke bestimmt. Sie ist für die einzelnen UV-Quellen in Abb. 24b-29b dargestellt. Die Erythemwirkungsfunktion 1 entspricht der DIN-Kurve, sie hat ein ausgeprägtes Minimum bei 280 nm, die zweite Erythemwirkungsfunktion steigt stetig zu kleineren Wellenlängen an. Da sich die ausgewählten Erythemwirkungsfunktionen bei einer Wellenlänge von etwa 290 nm kreuzen, überschneiden sich auch die entsprechenden Bestrahlungsstärken.

Das Wellenlängenintegral der spektralen erythemwirksamen Bestrahlungsstärke ergibt die erythemwirksame Bestrahlungsstärke oder Erythemwirksamkeit, sie ist in Tab. 2 als ERYSUM 1 bzw. ERYSUM 2 für die verschiedenen Strahler angegeben. Entsprechend dem Verlauf der Erythemwirkungsfunktionen ist in ERYSUM 2 der kurzwellige Anteil stärker berücksichtigt. Bei den mit den verschiedenen Wirkungsfunktionen er-

haltenen Bestrahlungsstärken handelt es sich nicht um Absolutwerte; dies ist beim Vergleich zu berücksichtigen (siehe VI.5).

Trotz der doch recht unterschiedlichen Wirkungsfunktionen unterscheidet sich die erythemwirksame Bestrahlungsstärke erstaunlich wenig. Läßt man das Solarium beiseite, finden sich bei den mit den beiden Wirkungsfunktionen errechneten Bestrahlungsstärken zwischen allen Strahlern Differenzen nur bis etwa 15%. Dies liegt sicher unterhalb einer bei biologischen Versuchen erzielbaren Meßgenauigkeit, sodaß bei Bestrahlungsversuchen mit diesen Strahlern auch keine Entscheidung über die Gültigkeit der einen oder anderen Wirkungsfunktion zu erwarten sein dürfte.

Das Spektrum des Solariums hingegen führt bei Bewertung mit den beiden Erythemwirkungsfunktionen zu deutlich unterscheidbaren Erythemwirksamkeiten. Die mit der DIN-Erythemwirkungsfunktion ermittelte Erythemwirksamkeit des Solariums ist je nach dem zur Berechnung verwendeten Vergleichsstrahler um 60%-80% größer als die mit der zweiten Kurve bestimmte Erythemwirksamkeit.

Dieser relativ große Unterschied liegt in der Spektralverteilung des Solariums begründet. Es hat im Gegensatz zu den anderen verwendeten Strahlern einen hohen Anteil an UV-B bei sehr kleinen UV-C-Anteil, das Verhältnis UV-B : UV-C beträgt hier 42 (die anderen Strahler liegen bei Werten von 3-10). Je geringer der Anteil des kurzwelligen UV-C, desto geringere Werte für die Erythemwirksamkeit errechnen sich mit der die kurzen Wellenlängen stärker bewertenden zweiten Erythemwirkungsfunktion im Ver-

gleich mit der DIN-Kurve.

5.8. Einige Bemerkungen zu den Meßergebnissen

Bezüglich der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen gelten die in Abschnitt IV.4 gemachten Angaben, d. h., die Genauigkeit ist bei sehr guter Reproduzierbarkeit im wesentlichen abhängig von der Güte der verwendeten Eichquelle. Die Qualität der Eichung dürfte in jedem Fall weit besser als die bei biologischen Messungen erreichbare Präzision sein.

Es wäre interessant, die erhaltenen Meßergebnisse mit den Herstellerangaben zu vergleichen. Leider konnte trotz mehrerer Nachfragen keinerlei Auskunft erhalten werden. Lediglich bezüglich der Hafi 500 HANAU waren Herstellerangaben vorhanden. Es ergibt sich folgende Zusammenstellung (100 cm Bestrahlungsabstand, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

	Hersteller		eigene Messung	
UV-A	670	48,5%	1150	59,1%
UV-B	480	34,8%	596	30,6%
UV-C	239	16,7%	201	10,3%

Beim Vergleich ist zu beachten, daß der in der Arbeit ermittelte Wert für UV-C nur Strahlung oberhalb einer Wellenlänge von 240 nm erfaßt und somit der bei der Hafi 500 HANAU hohe Anteil an kurzwelligerer Strahlung wegfällt. Zweitens nimmt durch Alterung des Quarz-Brenners im allgemeinen der Anteil an UV-B und noch stärker an UV-C ab, sodaß der relative Anteil an UV-A größer wird. Schließlich wird der Brenner bei dem zur Messung verwendeten Strahler nicht mehr

in Reihe mit den Infrarot-Strahlern als Vorwiderstand benutzt, sondern über eine Drossel mit Strom versorgt. Damit ergeben sich veränderte Betriebsbedingungen; Wahrscheinlich wird die Lampe mit geringfügig größerer Leistung betrieben, sodaß die Gesamtstrahlung zunimmt.

Zum Vergleich herangezogen wurde auch ein UV-Dosimeter*. Mit Hilfe zweier mit speziellen Filtern versehener Photoelemente soll der Bereich 290 nm - 330 nm bzw. 320 nm - 380 nm erfaßt werden, was in etwa UV-A und UV-B entspricht. Abgesehen davon, daß die Anzeige nur in Schritten von 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ erfolgt, war die Meßgenauigkeit beschränkt, es ergaben sich Abweichungen bis zum Faktor acht je nach Spektrum. Die Reproduzierbarkeit war jedoch sehr gut, sodaß es für den Einsatz in der Bestrahlungsplanung, wo ohnehin empirisch geeicht wird, gut verwendbar ist.

* UV-Dosimeter HANAU der HAUNAU Quarzlampen GmbH

VIII. Biologische Messungen

Im Folgenden soll untersucht werden, inwieweit zwischen verschiedenen Versuchspersonen bei Bestrahlung mit UV-Licht unterschiedlicher spektraler Verteilung Unterschiede bezüglich der Erythembildung der UV-Strahlung bestehen. Zusätzlich soll die Größenordnung der MED, der zur Erzeugung eines eben sichtbaren Erythems nötigen Bestrahlung, abgeschätzt werden. Die direkte Pigmentierung konnte nicht untersucht werden, da keine UV-Strahler mit genügend hoher UV-A-Strahlung zur Verfügung standen.

1. Die Auswahl der Strahlenquellen

Für die Bestrahlung sollten zwei Strahler ausgewählt werden. Sie sollten genügend erythemwirksame UV-Strahlung abgeben und sich hinsichtlich ihrer Strahlenqualität möglichst stark unterscheiden. Wegen der geringen erythemwirksamen Intensität und den damit verbundenen langen Bestrahlungszeiten wurden die UV-A-Strahler HANAU 3030 und Hafi 500 HANAU mit Filter sowie HANAU 3020 mit Filter nicht verwendet. Die Hafi 500 HANAU ohne Filter wurde wegen des relativ hohen UV-C-Anteils bei Wellenlängen unter 240 nm (mit unbekannter Intensität) ausgeschlossen.

Zu den Bestrahlungsversuchen wurden daher das Solarium HANAU und die Höhensonne HANAU 3020 herangezogen. Die HANAU 3020 hat einen UV-B-Anteil von 40% mit einem UV-C-Anteil von 10%, bezogen auf die Gesamt-UV-Strahlung. Es findet sich ein Verhältnis von UV-B : UV-C von 4. Das Solarium dagegen hat bei einem UV-B-Anteil von ebenfalls etwa 40% ein UV-C unter 1%, d. h. UV-B : UV-C hat den Wert 42.

Damit sind zwei Strahler ausgewählt, die sich bei etwa gleichem Anteil an UV-B an der Gesamtstrahlung stark im UV-C-Gehalt unterscheiden. Unterschiedlich starke Erythemreaktionen auf UV-C bei verschiedenen Versuchspersonen sollte daher einen biologisch meßbaren Unterschied zwischen den beiden Strahlenquellen hervorrufen.

2. Die Methode der Zeitquotienten-Bildung

Als Beispiel für eine verschieden starke Erythemreaktion auf UV-C wurden die zwei Erythemwirkungsfunktionen ERY 1 und ERY 2 (Abb. 22) mit unterschiedlicher Bewertung des UV-C ausgewählt. Die mit den beiden Wirkungsfunktionen ermittelten Werte für die erythemwirksame Bestrahlungsstärke sind aus den oben (VI. 5) angegebenen Gründen bei einer Strahlenquelle nicht direkt vergleichbar. Zur Entscheidung, ob ERY 1 oder ERY 2 die Erythemempfindlichkeit einer Versuchsperson besser annähert, wird daher die zur Erzeugung eines gleichstarken Erythems bei Bestrahlung mit den beiden Strahlern nötige Zeit bestimmt. Ist die Erythemwirkungsfunktion ERY 1 gültig, so müßte sich bei einer erythemwirksamen Bestrahlungsstärke $ERYSUM\ 1$ von $134\ \mu W/cm^2$ bzw. $281\ \mu W/cm^2$ für das Solarium bzw. die HANAU 3020 ein Zeitquotient für die gleiche Erythemstärke von $134 : 281$ oder etwa $1 : 2,1$ ergeben. Für die Erythemwirkungsfunktion ERY 2 errechnet sich ein Verhältnis von $85 : 295$ oder $1 : 3,5$.

In der praktischen Durchführung ist es nicht möglich, bei Bestrahlung mit zwei Strahlenquellen gleiche Erythemstärken zu erzeugen, um dann die dazu nötigen Bestrahlungszeiten zu vergleichen. Man wählt daher

besser folgendes Vorgehen: In einem Vorversuch wird bestimmt, in welcher Größenordnung die zu einem Erythem führende Bestrahlungszeit liegt. Im eigentlichen Bestrahlungsversuch wird dann mit Hilfe einer Lochmaske mit fünf Öffnungen, die nacheinander geöffnet werden, eine zeitlich abgestufte Bestrahlung appliziert. Die resultierenden Erythemstärken werden mit der im nächsten Abschnitt angegebenen Meßmethode quantifiziert und in einer graphischen Darstellung gegen die zugehörige Bestrahlungszeit aufgetragen. Durch Messung der zur gleichen Erythemstärke gehörenden Bestrahlungszeit t_1 bzw. t_2 für jeden der beiden Strahler kann dann das gewünschte Zeitverhältnis t_1/t_2 bestimmt werden. Bei der praktischen Durchführung werden die für jeden Strahler ermittelten je fünf Erythemmeßpunkte durch je eine Gerade mit Schnittpunkt auf der Ordinate angenähert und daraus t_1/t_2 durch Ausmessen in einer geeigneten Ordinatenhöhe bestimmt (Abb. 30).

3. Die Messung des Erythemgrades

3.1. Möglichkeiten zur Messung eines Erythems

Um das im letzten Abschnitt angegebene Auswertungsverfahren durchzuführen, benötigt man ein quantifizierbares Maß für die Stärke der Erythembildung. Dabei genügt es, wenn eine reproduzierbare, stetige Zuordnung zwischen dem Meßwert und der Stärke des Erythems gefunden wird; denn nach obigem Auswerteverfahren werden nur Punkte gleicher Erythemstärke verglichen.

In Vorversuchen wurden einige Möglichkeiten der Erythemmessung versucht. Der visuelle Vergleich mit Farb-

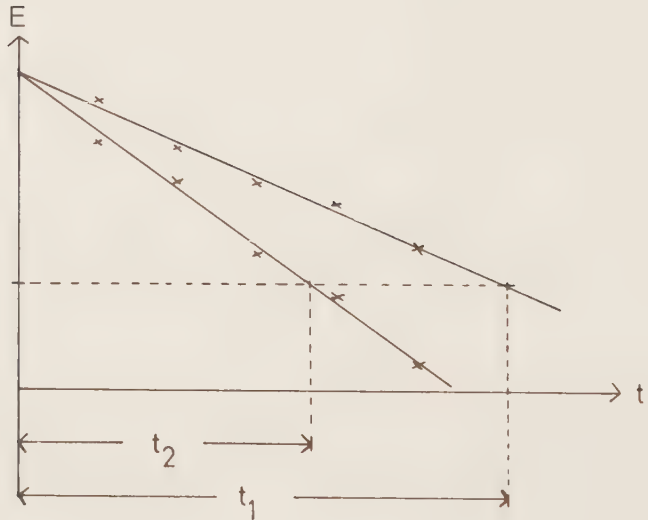


Abb. 30: Die Ermittlung des Zeitquotienten

Die Meßwerte des Erythemgrades E sind in relativen Einheiten gegen die Bestrahlungszeit t aufgetragen und durch je eine Gerade für jeden Strahler angenähert. Der Zeitquotient t_1/t_2 wird durch Bestimmung der Zeiten t_1 und t_2 in einer frei wählbaren Ordinatenhöhe und anschließende Quotientenbildung bestimmt.

mustern erwies sich als nicht praktikabel. Die Photometrie von durch ein Rotfilter aufgenommenen Schwarz-Weiß-Negativen war sehr umständlich und wurde nicht weiter verfolgt. Auch die Messung der durch die vermehrte Durchblutung hervorgerufenen Temperaturerhöhung scheint wegen der zahlreichen Einflußgrößen nicht zuverlässig. TRONNIER und WAGENER (60) geben ein Gerät zur Messung des von der Hautoberfläche zurückgeworfenen Lichtes an, detaillierte Untersuchungen folgen (56).

Am Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie wurde von DIRNAGL ein von HENSCHKE und SCHULZE (22) angegebenes Gerät modifiziert: durch eine Beleuchtungsoptik wird die Haut mit gefiltertem Licht beleuchtet, eine großflächige Selenzelle mißt das zurückgeworfene Licht. Eine Beschreibung des nochmals leicht modifizierten Gerätes findet sich bei RÜCKL (41). Statt des bisher verwendeten Farbglasgrünfilters wird dabei ein Interferenzfilter mit der Durchlaßwellenlänge 545 nm verwendet. Das Meßgerät hängt in einer Kardanischen Aufhängung und wird mit Seilzug und Gegengewicht mit einem bestimmten Aufpressdruck auf die Haut aufgesetzt. Das Erythemmeßgerät ist zur Haut hin mit einer Plexiglasscheibe abgeschlossen. Zur Eichung verwendet man eine mit MgO bedampfte Platte als 100%-Wert bzw. ein mit schwarzem Samt ausgekleidetes Rohr als 0%-Wert.

3.2. Methodische Schwierigkeiten mit dem vorhandenen Erythemmeßgerät

Mit dem vorhandenen Erythemmeßgerät wurden einige Versuchsmessungen durchgeführt. Es zeigte sich, daß die Handhabung des Gerätes sehr umständlich ist; es be-

durfte großer Mühe, um auch nur einigermaßen reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Mehrere Ursachen waren für diese Schwierigkeiten verantwortlich: Die Reibung in dem vorhandenen Seilzug mit Gegengewicht war im Vergleich zu den erwünschten geringen Auflagedrucken nicht zu vernachlässigen. Das Meßgerät und das fast gleichschwere Gegengewicht haben in Relation zum Auflagedruck eine sehr große träge Masse, sodaß die Meßanordnung der Bewegung der Haut (Atmung) nicht schnell genug folgen kann. Zudem bilden sich durch Aufsetzen auf nicht horizontal liegende Hautflächen starke Kippmomente, da der Aufsetzpunkt auf die Haut und der Kardanische Aufhängepunkt 20 cm auseinander liegen. Insgesamt ergibt sich dadurch ein sehr variabler und durch Kippbewegungen ungleichmäßig verteilter Auflagedruck. Der Einfluß des Auflagedruckes auf das Meßergebnis ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Es zeigt sich nämlich, daß selbst bei den geringsten praktisch möglichen Auflagedrucken das Erythem durch die Plexiglasscheibe zum Teil weggedrückt wird, vor allem, wenn bei schrägem Aufsetzen eine zusätzliche Kippbewegung eine ungleichmäßige Druckverteilung hervorruft.

Als weiterer Problempunkt erwies sich die Plexiglasscheibe selbst. Sie veränderte infolge Hautfett, Schweiß etc. ständig ihre Durchlässigkeit, was häufiges Nacheichen, Abwischen und eventuell eine Vorreinigung der Haut mit unbekannter Reizwirkung und Veränderung des Erythems nötig machte.

3.3. Verbesserungen am Erythemmeßgerät

Es wurde ein neuer Meßkopf konstruiert, der es gestattet, die Erythemstärke ohne Druck auf die Haut und ohne zusätzlich reflektierende Scheibe zu messen. Die Beleuchtung, die Filterung mittels Interferenzfilter und die Registrierung des von der Haut zurückgestrahlten Anteils durch eine großflächige Selenzelle mit nachgeschaltetem Strom-Spannungswandler wurde beibehalten.

Der Abstand Hautoberfläche - Photozelle wird jetzt nicht mehr durch eine Glasscheibe konstant gehalten, ist andererseits jedoch für die Geometrie des bestrahlenden wie des zurückgeworfenen und von der Selenzelle aufgefangenen Lichtes wichtig. Außerdem sollte der Abstand der Meßeinrichtung von der Hautoberfläche nicht zu groß sein, um den störenden Einfluß von Fremdlicht zu vermeiden. Daher wurden in den Fuß des Meßkopfes mit drei mal drei Mikrofedern drei Doppelkontakte eingebaut, die über je zwei Leuchtdioden für jeden Meßpunkt sowohl zu geringen wie zu großen Abstand anzeigen. Damit ist es möglich, die Meßanordnung senkrecht zur zu messenden Hautoberfläche und in genau bestimmten Abstand zu bringen. Die Meßpunkte der Abstandsmessung liegen dabei außerhalb des Erythemmeßfeldes, sodaß das Erythem selbst nicht beeinflusst wird.

Der Meßkopf hat die Form eines Kegelstumpfes und ist in Abb. 31 zusammen mit einer Gesamtansicht des Erythemmeßgerätes dargestellt. Er ist aus grauem Kunststoff gedreht, sodaß eine matte, nicht spiegelnde Oberfläche entsteht. Am Fuß des Kegelstumpfes befindet sich die Selenzelle, die eine zentrale Bohrung für den Beleuchtungsstrahlengang aufweist. Durch zusätzliche Blenden wurde der Beleuchtungsstrahl soweit eingengt,

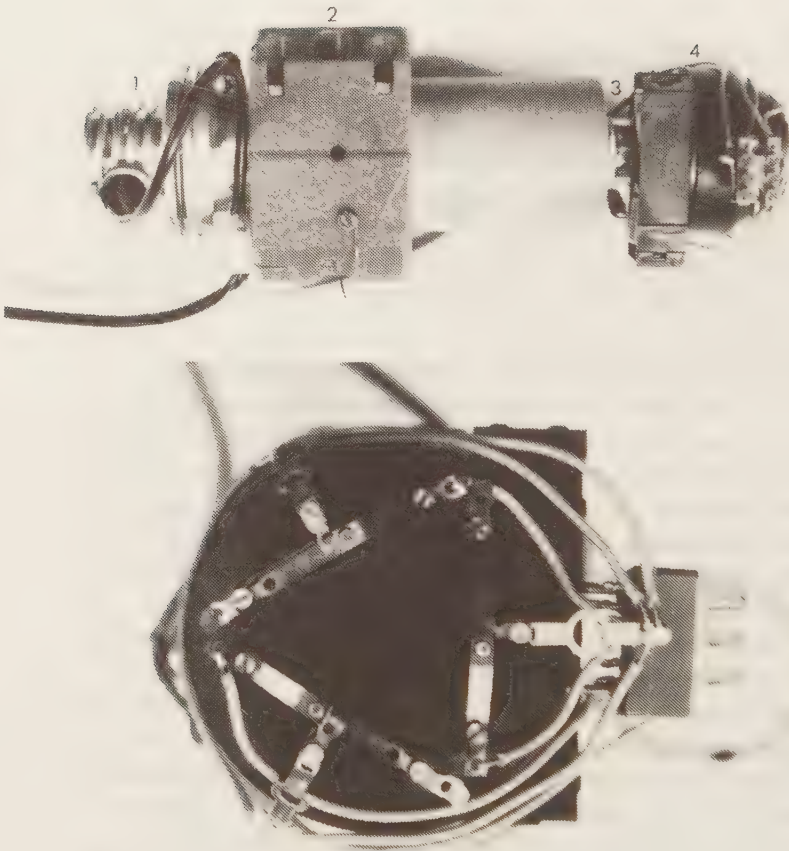


Abb. 31: Das Erythemmeßgerät

- Oben: Gesamtansicht des Erythemmeßgerätes:
- 1 Lampengehäuse mit Kühlblock
 - 2 Halterung für Interferenz- und Wärmeschutzfilter
 - 3 Beleuchtungsobjektiv
 - 4 Meßkopf mit 3 x 2 Leuchtdioden zur Abstands-
anzeige
- Unten: Ansicht des Meßkopfes von unten mit den Kontakt-
federn zur Einhaltung eines definierten Meßabstandes
(einige elektrische Verbindungsdrähte zur besseren
Übersicht entfernt). Mittig in der Meßöffnung ist
eine der zusätzlichen Blenden zur Eingrenzung des
Beleuchtungsstrahlenganges zu sehen.

daß aus der Meßapparatur selbst praktisch kein Streulicht auf die Selenzelle fällt. Da vor allem auch die Reflexion und Streuung an der Plexiglasscheibe wegfällt, ist jetzt kein "schwarzer Körper" zur Festlegung des Null-Wertes mehr nötig.

3.4. Die Durchführung der Erythemmessung

Die Messung selbst geht nach folgendem Schema vor sich: Bei ausgeschalteter Lampe wird mit der Offsetspannung des nachgeschalteten Verstärkers das Meßinstrument auf Null gestellt. Diese Nulleinstellung ist nur selten zu korrigieren. Danach wird die Lampenspannung solange erhöht, bis zusammen mit einer geeigneten Verstärkereinstellung 100 mV angezeigt werden. Als 100% Reflexionsfläche hat sich dabei wegen der gegenüber BaSO_4 oder MgO besseren Handbarkeit ein matt abgedrehtes Teflonplättchen bewährt. Die Meßanordnung wird anschließend auf das zu messende Hautareal aufgesetzt und solange leicht in der Lage zur Haut variiert, bis die Leuchtdioden eine korrekte Lage anzeigen. Mit einiger Übung gelingt dies relativ rasch, sodaß keine komplizierten Aufhängevorrichtungen nötig sind. Der abgelesene Meßwert gibt direkt die Remission in Prozent an.

3.5. Die Genauigkeit der Erythemmessung

Es hat sich gezeigt, daß die Messung des Erythemgrades nach obiger Methode sehr gut reproduzierbare Meßwerte liefert. Dies dürfte im wesentlichen auf die berührungslose Messung, die jede Veränderung des Erythems durch den Meßvorgang ausschließt, zurückzuführen sein. Voraussetzung ist allerdings, daß sich die Versuchsperson während der Bestrahlung und der Erythem-

messung in derselben Körperlage befindet, sodaß eine Verfälschung durch unterschiedliche Spannung von Haut und Unterhautfettgewebe zu vernachlässigen ist. Daneben ist die Intensität des Erythems auch abhängig vom Ausmaß der peripheren Vasokonstriktion im Rahmen der Temperaturregulation. Die Messungen sollten daher in einem gut temperierten Raum durchgeführt werden.

Der Absolutwert des Erythemgrades, der außer von der Temperaturregulation noch von weiteren, zum Teil nicht definierten vegetativen Faktoren abhängen dürfte, ist bei der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Meßmethode von untergeordneter Bedeutung; denn infolge der oben angegebenen Errechnung von Verhältniszahlen werden nur relative Werte berücksichtigt. Somit spielen nur Veränderungen während der Meßzeit eine Rolle. Diese können durch die infolge der verbesserten Meßapparatur stark verkürzten Meßzeiten klein gehalten werden.

Die Meßgenauigkeit der Apparatur ist infolge der, wie oben beschrieben, in Sekunden und somit vor jeder Messung durchzuführenden Eichung sehr gut und liegt bei 2% bei Messung der Remission eines festen Körpers. Die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Erythemmessung hängt etwas von der Geschicklichkeit des Messenden ab, eine Abschätzung der Genauigkeit aus Meßreihen an Versuchspersonen ergibt Werte um 6%, errechnet als Standardabweichung bei zehnmaliger Messung eines bestimmten Hautareals.

4. Die Durchführung der Messungen

4.1. Die Versuchspersonen

Zu den Messungen des Erythemgrades nach UV-Bestrahlung mit den beiden oben angegebenen Strahlenquellen wurden vier Versuchspersonen ausgewählt:

- Versuchsperson 1 war männlich, persischer Abstammung, dunkelhaarig, dunkler Hauttyp mit geringer Sonnenempfindlichkeit;
- Versuchsperson 2 war weiblich, hellblond mit eher blasser Hautkolorit, nach eigenen Angaben eher sonnenempfindlich;
- Versuchsperson 3 war weiblich, dunkelblond mit normaler Hautfarbe und normaler Sonnenempfindlichkeit;
- Versuchsperson 4 war weiblich, mittelblond mit blasser Haut, deutlich sonnenempfindlich; sie war bei früheren UV-Messungen als besonders empfindlich und teilweise ungewöhnlich reagierend aufgefallen.

Die Versuchspersonen waren in den letzten Monaten keiner UV-Strahlung ausgesetzt (die Messungen wurden im Frühjahr durchgeführt); somit war kaum noch eine reaktive Pigmentierung vorhanden.

4.2. Der Ablauf der UV-Bestrahlung

In Vorversuchen wurde versucht, optimale Bedingungen während der Bestrahlung und der nachfolgenden Erythemmessung zu erreichen. Folgendes standardisiertes Vorgehen hat sich bewährt und wurde bei den Messungen angewendet:

Vor der eigentlichen UV-Bestrahlung (Hauptversuch) wird die UV-Empfindlichkeit einer Versuchsperson durch Anlegen einer einfachen Erythemtreppe bestimmt, um später die richtige Dosis für eine gut abgestufte Erythemstärke festlegen zu können.

Vor Beginn des Hauptversuches wird die Versuchsperson bequem auf einer Liege gelagert, wobei besonders darauf geachtet wird, daß die Haut möglichst wenig angespannt ist. Zum Ausschluß von Unterschieden in der Pigmentierung (z. B. als Folge von Badebekleidung) wird das Bestrahlungsfeld orientierend mit dem Reflexionsmeßgerät ausgemessen und danach endgültig festgelegt. Im Rahmen der hier angegebenen Messungen wurde jeweils ein Gebiet beidseits der Lendenwirbelsäule ausgewählt.

Für die Bestrahlung wurde eine Hartgummischablone mit fünf ausgestanzten Löchern von etwa 20 mm Durchmesser verwendet. Ein Schieber ermöglichte es, die Öffnungen nacheinander zu öffnen und somit verschiedene Bestrahlungszeiten zu wählen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die runden Bestrahlungsfelder mit einem Filzschreiber zu markieren, dies ermöglicht eine sichere Reflexionsmessung auch in den Feldern, in denen sich noch keine sichtbare Erythemwirkung abgezeichnet hat. Außerdem ist eine (gegenüber der Bestrahlung) andere Spannung der Haut an einer ovalen Verformung der Kreisscheiben erkennbar und durch eine andere Lagerung der Versuchsperson auszugleichen.

Die Bestrahlung wurde im Liegen durchgeführt, der Abstand Haut - Unterkante Reflektor betrug 100 cm. Die Strahlenquellen brannten mindestens fünf Minuten ein. Während dieser Zeit war die Versuchsperson mit Tüchern abgedeckt. Die Bestrahlungszeiten waren entsprechend den Vorversuchen so gewählt, daß die mini-

male Erythemdosis (MED) in etwa im mittleren Feld appliziert wurde und sich eine gute Abstufung ergab.

24 Stunden nach der Bestrahlung wurden die Erythemgrade mit Hilfe des Reflexionsmeßgerätes quantitativ erfaßt. Daneben wurde durch visuellen Vergleich eine grobe Rangfolge festgelegt. Zur Dokumentation wurden auch Diapositive angefertigt. Die Meßergebnisse sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

5. Die Meßergebnisse der UV-Bestrahlung

In Abb. 32-33 sind die Meßergebnisse in graphischer Darstellung angegeben: Als Abszisse ist die Bestrahlungszeit aufgetragen, die Ordinate gibt die zur jeweiligen Bestrahlungszeit gehörenden Erythemgrade bei Bestrahlung mit dem Solarium bzw. dem Strahler HANAU 3020 wieder, gemessen mit dem Remissionsmeßgerät 24 Stunden nach Bestrahlung. Es ergibt sich eine Punkteschar, die sich gut durch je eine Gerade annähern läßt. Das Verhältnis der mit den beiden Strahlern zur Erzeugung jeweils gleicher Erythemgrade nötigen Bestrahlungszeiten ("Zeitquotient") wurde nach dem in Abb. 30 skizzierten Verfahren bestimmt, die Interpolationsgeraden und das zugehörige Verhältnis t_1/t_2 sind angegeben. Als Schnittpunkte der beiden Geraden wird ein aus drei Messungen an unbestrahlten Hautarealen gewonnener Mittelwert genommen.

Versuchsperson 1 hat eine etwas dunklere Hautfarbe, entsprechend ist die Remission deutlich geringer als bei den anderen Versuchspersonen. Bei Bestrahlung ergibt sich ein stetiger Abfall der Remission, wobei auffällt, daß die beiden Interpolationsgeraden nahe beieinander liegen. Entsprechend klein ist der Zeit-

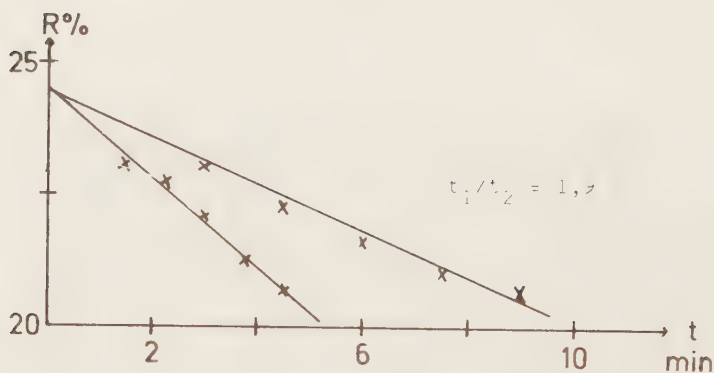


Abb. 32a: Meßergebnisse für Versuchsperson 1

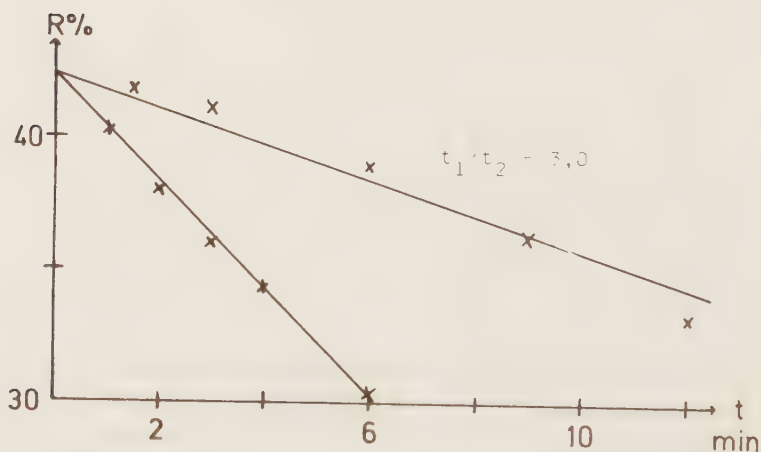


Abb. 32b: Meßergebnisse für Versuchsperson 2

Abb. 32 und Abb. 33:

Der Erythemgrad, ausgedrückt in Remissionswerten R , für das Solarium (obere Kurve) und die Hanau 3020 (untere Kurve) ist aufgetragen gegen die Bestrahlungszeit. Die Interpolationsgeraden und der daraus ermittelte Zeitquotient t_1/t_2 sind angegeben.

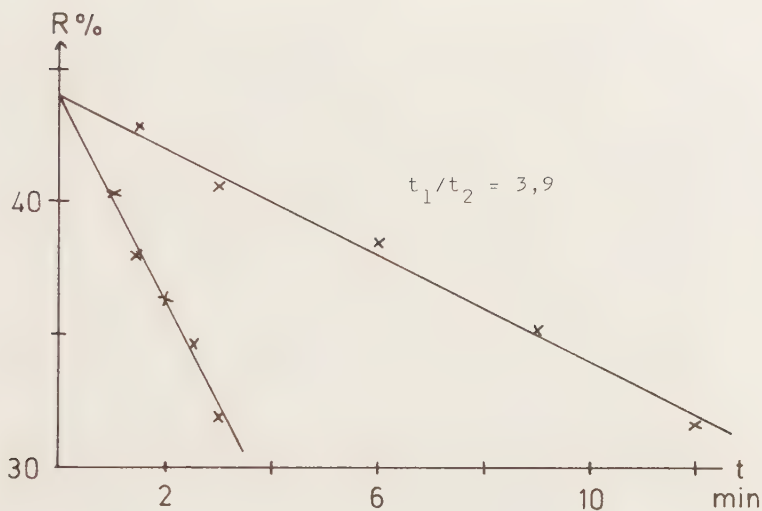


Abb. 33a: Meßergebnisse für Versuchsperson 3

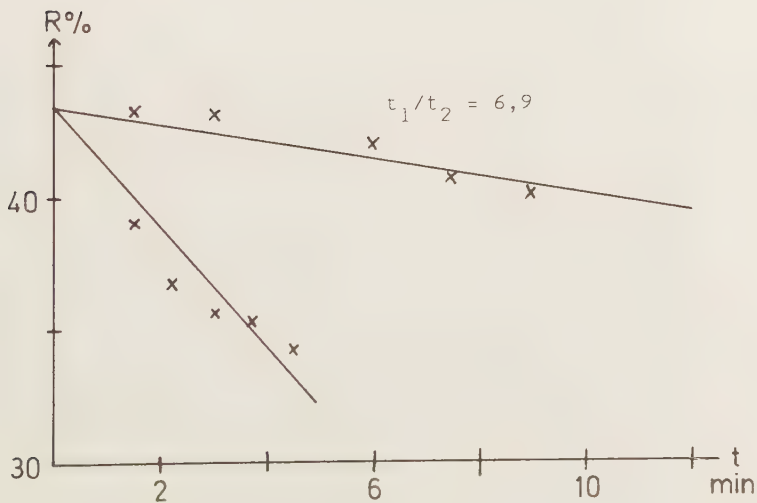


Abb. 33b: Meßergebnisse für Versuchsperson 4

quotient für gleiche Erythemstärke, er beträgt 1,9 (Abb. 32a).

Versuchsperson 2 hat eine hellere Hautfarbe und einen deutlich höheren Remissionsgrad der unbestrahlten Haut. Die Remissionsmessung nach Bestrahlung zeigt zwei Wertescharen, die deutlich mehr divergieren als bei Versuchsperson 1 (Abb. 32b). Der Zeitquotient für Versuchsperson 2 liegt bei 3,0.

Versuchsperson 3 zeigt einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf wie Versuchsperson 2 (Abb. 33a), es errechnet sich ein Zeitquotient von 3,9.

Bei Versuchsperson 4 zeigen sich noch größere Unterschiede bei Bestrahlung mit beiden Strahlern (Abb. 33b): Während bei der Bestrahlung mit der HANAU 3020 eine sehr starke Erythembildung auftrat, wurde bei Bestrahlung mit dem Solarium nur eine minimale Erythemwirkung beobachtet. Damit liegt der Zeitquotient bei 6,9 und damit sehr hoch.

Die großen Unterschiede der sogenannten Zeitquotienten liegen weit außerhalb der Meßgenauigkeit. Die Fehlerbreite der spektralen Bestrahlungsstärke liegt nach den Ausführungen in IV.4 bei 5%. Die Erythemmessung mit einem Fehler von 6% bei der Einzelmessung und die Bildung des Zeitquotienten durch lineare Regression der beiden Wertemengen bringen weitere Fehlerbreiten, wobei durch die lineare Regression die Fehlerbreite im Sinne einer Mittelwertbildung gegenüber der Ergebnisbildung aus Einzelmeßwerten vermindert wird. Eine Abschätzung mit Hilfe der Regressionsrechnung ergibt Werte um 8%. Insgesamt liegt die Fehlerbreite des Zeitquotienten bei 15-20%. Die Unterschiede der Zeitquotienten bei den einzelnen Versuchspersonen

sind damit hoch signifikant, d. h. sie beruhen auf systematischen Einflußfaktoren.

Neben der Bestimmung des Zeitquotienten wurde zusätzlich die zur Erzeugung eines eben sichtbaren Erythems nötige Energiemenge, die minimale Erythemdosis (MED), abgeschätzt. Eine genaue Angabe war insofern erschwert, als die Staffelung der Bestrahlungszeiten für die Ermittlung der MED zu grob ist. Die zur MED gehörende Bestrahlungszeit wurde durch visuelle Beurteilung des Erythemgrades bei Tageslicht und eventuelle Interpolation ermittelt, die Werte sind lediglich als grobe Anhaltspunkte zu betrachten.

Für die HANAU 3020 ergibt sich eine Zeit von etwa ein bis eineinhalb Minuten zur Erzeugung eines eben sichtbaren Erythems bei allen vier Versuchspersonen. Aus einer erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von etwa $290 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ errechnet sich eine MED von $17\text{--}26 \text{ mWsec}/\text{cm}^2$.

Beim Solarium ist die Streubreite viel größer, es finden sich Bestrahlungszeiten von etwa drei (Versuchsperson 1), etwa sechs (Versuchspersonen 2 und 3) sowie elf (Versuchsperson 4) Minuten zur Erzeugung eines Erythems. Aus der mit der Erythemwirkungsfunktion ERY 1 berechneten erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von $134 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ergibt sich eine MED von $24\text{--}88 \text{ mWsec}/\text{cm}^2$, die Berechnung mit Hilfe von ERY 2 ergibt eine MED von $15\text{--}56 \text{ mWsec}/\text{cm}^2$. Die ermittelten Werte für die MED liegen alle innerhalb der von anderen Autoren angegebenen Streubreite (siehe VI.3).

6. Diskussion der biologischen Messungen

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und im ersten Teil ausführlich dargestellte Apparatur ermöglicht die Messung und Registrierung von UV-Spektren in einer zur Weiterverarbeitung mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung geeigneten Form. Durch Faltung der spektralen Intensität mit einer relativen spektralen Erythemwirkungsfunktion erhält man die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke.

Zur Berechnung wird, wie oben erläutert, neben der "klassischen" Erythemwirkungsfunktion noch eine zweite herangezogen, die die kurzen Wellenlängen stärker bewertet. Beim Vergleich der mit den beiden Wirkungsfunktionen für einige UV-Strahler errechneten Bestrahlungsstärke fällt auf, daß sich die Bestrahlungsstärken bei Bewertung mit den beiden Wirkungsfunktionen trotz deutlich unterschiedlicher Spektren oft nur gering unterscheiden; lediglich das Solarium zeigt relevante Differenzen. Das Fehlen größerer Unterschiede bei den meisten Strahlern erklärt vielleicht, warum bisher über Diskrepanzen nicht berichtet wurde und die universelle Gültigkeit einer einzigen Erythemwirkungsfunktion postuliert und in den DIN-Normen festgehalten wurde.

Die Möglichkeit, die biologisch wirksame Bestrahlungsstärke für verschiedene Strahler mit vertretbarem Aufwand zu berechnen, erlaubt nun, geeignete Strahler mit hinreichend großen Unterschieden auszuwählen.

Die Bestrahlung wurde mit je zwei Strahlern an vier Versuchspersonen durchgeführt, die Ergebnisse wurden im Abschnitt VIII.5 dargestellt. Die Bestrahlung mit

zwei Strahlern und die Ermittlung des sogenannten Zeitquotienten ist nötig, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, da die mit Hilfe relativer Wirkungsfunktionen errechneten (relativen) biologisch wirksamen Bestrahlungsstärken nicht direkt vergleichbar sind (siehe VI.5).

Versuchsperson 1 zeigt mit einem Zeitquotienten von 1,9, daß die Erythemwirksamkeit von UV-Strahlung durch die Erythemwirkungsfunktion ERY 1 deutlich besser beschrieben wird als durch ERY 2, der theoretische Zeitquotient für ERY 1 liegt bei 2,1.

Versuchsperson 2 und Versuchsperson 3 dagegen werden mit einem Zeitquotienten von 3,0 bzw. 3,9 durch die Erythemwirkungsfunktion ERY 2 mit einem errechneten Quotienten von 3,5 deutlich besser angenähert.

Die Erythemempfindlichkeit von Versuchsperson 4 schließlich wird von keiner der beiden Wirkungsfunktionen hinreichend beschrieben (Zeitquotient 6,9).

Das Ergebnis läßt sich trotz der kleinen Zahl von Versuchspersonen nur so interpretieren, daß das Postulat einer generell gültigen Erythemwirkungsfunktion nicht haltbar ist. Es gibt offenbar Personen (wie etwa Versuchsperson 1), deren Erythemempfindlichkeit durch die "klassische" Standarderythemwirkungsfunktion gut beschrieben wird, die also eine minimale Erythembildung bei 280 nm aufweisen und zu kurzen Wellenlängen hin wieder einen mäßigen Anstieg der Erythemempfindlichkeit haben. Dabei liegt die Empfindlichkeit bei 250 nm deutlich unter der für 300 nm. Andererseits gibt es Personen (Versuchspersonen 2 und 3), die bei Strahlung im Bereich 300 nm eine deutlich geringere Erythembildung aufweisen als bei kürzeren Wellenlängen.

Diese Personengruppe zeigt bei Bestrahlung mit dem Solarium, das einen hohen Anteil an UV-B, jedoch nur wenig UV-C abgibt, eine geringere Erythembildung. Die UV-Reaktion dieser Personengruppe wird dabei durch die Erythemwirkungsfunktion ERY 2 hinreichend beschrieben. Daneben gibt es Personen, wie Versuchsperson 4, deren Erythembildung auf UV-B im Verhältnis zu UV-C noch geringer ist als es durch die Funktion ERY 2 beschrieben ist, d. h. deren Erythemwirkungsfunktion verläuft noch steiler.

Daneben ist es denkbar, daß bei Untersuchung einer größeren Serie von Versuchspersonen weitere Reaktionstypen entdeckt werden. Naturgemäß kann bei einer aus vier Versuchspersonen bestehenden Serie auch nichts über die Häufigkeit der einzelnen Empfindlichkeitstypen ausgesagt werden.

Unberücksichtigt blieb der Einfluß des Ablesezeitraums, alle Messungen wurden 24 Stunden nach Bestrahlung durchgeführt. Ein wellenlängenabhängig unterschiedlicher Zeitverlauf hätte eine mit dem Ablesezeitraum variierende Erythemwirkungsfunktion zur Folge.

Der Einfluß der Feldgröße und der intradermalen Streustrahlung ist bei einem Bestrahlungsfeld von 2 cm Durchmesser sicher vernachlässigbar. Auch die Bestrahlungszeit liegt bei beiden Strahlenquellen in derselben Größenordnung.

Der Einwand, daß die Erythemwirkungsfunktion im allgemeinen über die MED ermittelt wird und somit im strengen Sinn auch nur für ein eben sichtbares Erythem Gültigkeit besitzt, kann ebenfalls nicht als hinreichende Erklärung für die Diskrepanz gelten.

Denn die Meßpunkte in Abb. 32-33, wo der gemessene Erythemgrad gegen die Bestrahlungszeit aufgetragen ist, lassen sich mit relativ großer Genauigkeit durch eine Gerade approximieren, d. h. auch bei Verwendung nur der zur MED gehörenden Bestrahlungszeiten ergeben sich ähnliche Zeitverhältnisse. Der in etwa lineare Verlauf bedeutet andererseits, daß bis zur erzeugten Erythemstärke keine größere Abhängigkeit der Erythemwirkungsfunktion von der Erythemstärke zu beobachten ist.

Ein weiterer Hinweis dafür, daß die Standard-Erythemwirkungsfunktion die Erythemempfindlichkeit einzelner Versuchspersonen nur unzureichend wiedergibt, sind die zum Teil beträchtlichen Unterschiede, die sich bei der Ermittlung der MED mit den beiden Strahlern ergeben. Bei richtig gewählter Erythemwirkungsfunktion müßte per definitionem die MED unabhängig von der Art der Bestrahlungsquelle denselben Wert besitzen. Wegen der sehr viel größeren Genauigkeit der Zeitquotienten-Methode wurde die MED nur zur Orientierung ermittelt und nicht weitergehend gewertet.

Schließlich sei erwähnt, daß die gewählten Erythemwirkungsfunktionen ERY 1 und ERY 2 in dem Sinn extreme Wirkungsfunktionen sind, als fast alle in der Literaturübersicht diskutierten Erythemwirkungsfunktionen vom Kurvenverlauf her zwischen ERY 1 und ERY 2 liegen. Damit dürften auch die mit diesen Erythemwirkungsfunktionen errechneten Zeitquotienten zwischen 2 und 3,5 liegen und somit keine bessere Anpassung ergeben. Lediglich die von ADAMS, BORNES und FORSYTHE (1) veröffentlichten Wirkungsfunktionen liegen (im Abhängigkeit vom Erythemgrad) zum Teil außerhalb des von ERY 1 und ERY 2 umfaßten Bereiches.

Die Tatsache, daß sich die Meßwerte bei der Zeitquotientenbildung gut durch eine Gerade annähern lassen, spricht jedoch gegen eine relevante Änderung der Erythemwirkungsfunktion mit der Stärke des Erythems im Bereich der im Rahmen dieser Arbeit erreichten Erythemgrade.

Die unterschiedliche Erythembildung ist nach dem oben gesagten nicht meßmethodisch bedingt. Als biologische Ursachen kommen eine unterschiedliche Absorption der UV-Strahlung vor Erreichen der erythembildenden Struktur sowie eine unterschiedliche Reagibilität derselben in Frage. Wechselwirkungen zwischen Absorption und Reagibilität sind denkbar. Die Absorption ist im wesentlichen durch die Pigmentierung, die Dicke der Hornschicht und den Absorptionskoeffizienten bestimmt, wobei der Absorptionskoeffizient etwa durch den Gehalt an Wasser, Fett, Urocaninsäure oder Pigmentkörnern variiert wird. Die Reagibilität schließlich könnte abhängig sein von Geschlecht, Jahreszeit, hormonellen Einflüssen und/oder Medikamenten, um nur einige zu nennen.

7. Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik ermöglicht es, durch Wahl geeigneter, für verschiedene Erythemwirkungsfunktionen möglicherweise verschiedener Strahlungsquellen und Berechnung des Zeitquotienten bei Bestrahlung mit mindestens zwei Strahlern die Brauchbarkeit der Erythemwirkungsfunktionen für verschiedene Versuchspersonen relativ einfach festzustellen. Durch Messung einer größeren Zahl von Versuchspersonen müßte es möglich sein, die biologische Variationsbreite abzuschätzen und mögliche Korre-

lationen zu Geschlecht, Pigmentierung, Vorbehandlung etc. herzustellen. Durch Veränderung der Erythemwirkungsfunktion und Errechnen des theoretischen Zeitquotienten könnten eventuell Funktionen mit besserer Annäherung gefunden werden. Gegenüber der technisch aufwendigen und methodisch schwierigen Bestrahlung mit monochromatischer Strahlung, die allein die direkte Messung einer Erythemwirkungsfunktion ermöglicht, hat dieses indirekte Verfahren den Vorteil der sehr viel besseren Praktikabilität bei der Durchmusterung einer größeren Zahl von Versuchspersonen.

Durch umfangreichere Messungen mit gestaffelten Bestrahlungszeiten und zeitlich gestaffelte Messung des Erythemgrades müßte sich weiterhin entscheiden lassen, inwieweit sich die Erythemwirkungsfunktion bei Bestrahlung mit einem Mehrfachen der minimalen Erythemdosis gegenüber einer niedrigen Dosierung ändert (Dosisabhängigkeit) bzw. inwieweit eine unterschiedliche zeitliche Erythembildung einen Einfluß ausübt (Zeitabhängigkeit der Erythembildung).

Untersuchungen dieser Art müssen an einer großen Zahl von Versuchspersonen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die apparativen Voraussetzungen geschaffen in Form eines automatischen Spektrometers mit der Möglichkeit der Weiterverarbeitung der Daten in der elektronischen Datenverarbeitung. Zusätzlich können durch die verbesserte Ausführung des Erythemmeßgerätes Erythemgrade genauer quantifiziert werden. Schließlich erlaubt die Methode der Zeitquotientenbildung, auf das ungenaue und aufwendige Verfahren der Ermittlung der MED zu verzichten.

IX. Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wird ein digitalisiertes Spektrometer zur Bestimmung der Erythemwirksamkeit verschiedener UV-Strahler entwickelt: Eine spezielle Strahleinkopplung ermöglicht die Bewertung von mit verschiedenen Einfallswinkeln einfallender Strahlung gemäß einem Cosinusetz. Zur Wellenlängendiskriminierung wird ein kommerzielles Quarzprisma-Spektrometer verwendet. Die Registrierung der Strahlung erfolgt durch einen Photomultiplier, wobei besondere Vorkehrungen zur Linearisierung der Verstärkung, zur Änderung der Empfindlichkeit sowie zur Korrektur des Dunkelstroms getroffen sind. Die Verstellung der Wellenlänge erfolgt durch einen Schrittmotor über ein dreistufiges Zwischengetriebe, der Schrittmotor wird über eine Steuereinheit und ein variables Interface angesteuert, um die Schrittmotor-Getriebe-Einheit universell einsetzen zu können. Eichkurven für die Zuordnung der Wellenlänge zur Schrittzahl sowie - unter Verwendung eines Strahlers bekannter Intensität - für die Intensitätseichung werden bestimmt. Die Meßergebnisse liegen in digitalisierter Form auf Lochstreifen vor und können in der elektronischen Datenverarbeitung weiterverarbeitet werden.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Apparatur wird die Spektralverteilung einiger UV-Strahler bestimmt; daraus werden einige Kenndaten sowie die erythem- und pigmentwirksame Bestrahlungsstärke errechnet, wobei neben der Standarderythemwirkungsfunktion nach DIN 5031 mit einem ausgeprägten Minimum bei etwa 280 nm auch eine zu kürzeren Wellenlängen hin stetig ansteigende Wirkungsfunktion herangezogen wird.

Durch Bestrahlung einiger Versuchspersonen mit zwei aufgrund der Messungen und theoretischer Überlegungen ausgewählten UV-Strahlern wird eine Erythemtreppe mit unterschiedlichen Erythemgraden erzeugt. Zur Quantifizierung des Erythemgrades wird der Meßkopf eines vorhandenen Meßgerätes neu konstruiert, sodaß eine Messung ohne Berührung der Haut und somit ohne mechanische Beeinflussung des Erythemgrades möglich ist. Durch ein spezielles Auswerteverfahren konnte gezeigt werden, daß die Annahme einer allgemeingültigen Erythemwirkungsfunktion, wie sie etwa in der DIN festgelegt ist, nicht haltbar ist. Das Ausmaß der interindividuellen Streuung und mögliche Ursachen werden diskutiert.

X. LITERATURVERZEICHNIS

- (1) ADAMS, E.Q.,
BORNES, B.T.,
FORSYTHE, W.E.: Über die Erythemwirksamkeit
ultraviolettten Lichts.
Strahlenth. 48, 235 (1933)
- (2) AMELUNG, W.,
EVERS, A.,
(Hrsg.): Handbuch für Bäder- und
Klimaheilkunde.
Schattauer Verlag.
Stuttgart (1962)
- (3) BACHEM, A.: Time factors of erythema
and pigmentation, produced
by ultraviolet rays of
different wavelengths.
Journ. Invest. Dermat. 25,
215, (1955)
- (4) BERNHARD, O.: Sonnenlichtbehandlung in
der Chirurgie. Neue deutsche
Chirurgie. Bd. 23.
Enke Verlag.
Stuttgart (1923)
- (5) BRUINING, H.: Physics and Application of
Secondary Electron Emission.
Verlag Pergamon Press.
London (1954)
- (6) BUDDE, H.W.: Integrating Sphere for the
Photometry of the Sky.
Appl. Opt. 3, 939 (1964)
- (7) CLAEISSON, S.,
JUHLIN, L.,
WETTERMARK, G.: The reciprocity law of UV-
Radiation effects.
Acta dermato-venerologica
38, 123 (1958)
- (8) COBLENTZ, W.W.,
STAIR, R.: Data on the spectral ery-
themic reaction of the
untanned human skin to
ultraviolet radiation.
Bur. Stand. J. Res. 12,
13 (1934)
- (9) DIETRICH, E.,
KAMINER, S.,
(Hrsg.): Handbuch der Balneologie,
medizinischen Klimatologie
und Balneographie. Bd. IV.
Thieme Verlag.
Leipzig (1924)

- (10) DRESLER, A.: Zur Messung und Berechnung der Selektivität der Ulbrichtschen Kugel. Licht 11, 180 (1941)
- (11) ELENBAAS, W.: Quecksilberdampf-Hochdruck-Lampen. Philipps Technische Bibliothek. Eindhoven (1966)
- (12) EVERETT, M.A., SAYRE, R.M., OLSON, R.L.: The biologic effects of ultraviolet radiation, ed. by F. Urbach. Verlag Pergamon Press. Oxford (1969)
- (13) FINSEN, N.R.: Über die Bedeutung der chemischen Strahlen des Lichtes für Medizin und Biologie. Verlag F.C.W. Vogel. Leipzig (1899)
- (14) GOBRECHT, H.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. IV.: Optik. Verlag de Gruyter. Berlin (1974)
- (15) HAMAMATSU TV CO, LTD.: Photomultiplier Tubes. Datenblatt (1979)
- (16) HAÜBER, I.: Über spezifische Wirkungen des langwelligen ultravioletten Lichts auf die menschliche Haut. Strahlenth. 62, 315 (1938)
- (17) HAÜSSER, K.W.: Einfluß der Wellenlänge in der Strahlenbiologie. Strahlenth. 28, 25 (1928)
- (18) HAÜSSER, K.W., VAHLE, W.: Die Abhängigkeit des Lichterythems und der Pigmentbildung von der Schwingungszahl (Wellenlänge) der erregenden Strahlung. Strahlenth. 13, 41 (1921)
- (19) HAÜSSER, K.W., VAHLE, W.: Sonnenbrand und Sonnenbräunung. Wiss. Veröffentlichung Siemenswerke 6, 101 (1927)

- (20) HELWIG, H.J.: Kugel oder Kasten beim
Ulbricht-Photometer?
Licht 12, 85 (1942)
- (21) HENSCHKE, G.: Die Winkelabhängigkeit des
Ultravioletterythems und
ihre Bedeutung für die
Dosimetrie.
Strahlenth. 77, 297 (1948)
- (22) HENSCHKE, U.,
SCHULZE, R.: Methodik von Erythem- und
Pigmentversuchen.
Strahlenth. 63, 236 (1938)
- (23) HENSCHKE, U.,
SCHULZE, R.: Untersuchungen zum Problem
der Ultraviolett-Dosimetrie.
Strahlenth. 64, 14 (1939)
- (24) HENSCHKE, U.,
SCHULZE, R.: Wirkung der Sonnenstrahlung
auf die Haut.
Strahlenth. 64, 43 (1939)
- (25) HERRMANN, F.,
IPPEN, H. et al.: Biochemie der Haut.
Verlag Thieme.
Stuttgart (1973)
- (26) HÖFERT, J.: The "Speed" of Monochromators.
Zeiss Information 60, 59
(1966)
- (27) KIEFER, J.: Ultraviolette Strahlung.
Verlag de Gruyter.
Berlin (1977)
- (28) KOLLER, R.L.: Ultraviolet Radiation.
Verlag Wiley and Sons.
New York (1965)
- (29) KREFFT, H.,
RÖßLER, F.,
RÜTTENAUER, A.: Ein neues Strahlungsnormal.
Z. techn. Physik 18, 20
(1937)
- (30) LARCHÉ, K.: Maße einer speziellen Kugel
mit Schutter.
Licht 12, 110 (1941)
- (31) LENK, R.,
GELLERT, W.,
(Hrsg.): Fachlexikon ABC-Physik.
Bd. I und II.
Verlag Deutsch.
Zürich (1974)

- (32) LUCKIESH, M.,
HOLLADAY, L.L.,
TAYLOR, A.H.: Reaction of untanned human
skin to ultraviolet
radiation.
J. Opt. Soc. Am. 20, 432
(1930)
- (33) MAGNUS, I.A.: Studies with a Monochromator
in the common idiopathic
Photodermatoses.
Brit. J. Derm. 76, 245 (1964)
- (34) MEYER, A.E.H.,
SEITZ, E.O.: Ultraviolette Strahlen.
Verlag de Gruyter.
Berlin (1949)
- (35) MORTON, G.A.: Photon Counting.
Appl. Opt. 7, 1 (1968)
- (36) MUTZHAS; F.: Sofortbräunung.
Kosmetik International 9, 57
(1979)
- (37) NASEMANN, T.,
SAUERBREY, W.: Lehrbuch der Hautkrankheiten
und venerischen Infektionen.
Verlag Springer.
Berlin (1977)
- (38) OLSON; R.L.,
SAYRE, R.M.,
EVERETT, M.A.: Effect of anatomic location
and time on ultraviolet
erythema.
Arch. Derm. 93, 211 (1966)
- (39) OLSON, R.L.,
SAYRE, R.M.,
EVERETT, M.A.: Effect of field size on
ultraviolet minimal erythema
dose.
J. Invest. Derm. 45, 516
(1965)
- (40) PRANDTL, W.: Deutsche Chemiker in der
ersten Hälfte des 19. Jahr-
hunderts.
Verlag Chemie.
Weinsheim/Bergstr. (1956)
- (41) RÖCKL, W.: Ein photometrisches Ver-
fahren zur Messung von Ery-
them und Pigment der Haut.
Medizinische Dissertation
Universität München (1984)

- (42) ROTTIER, P.B.: The erythematogenous action of ultraviolet light on human skin. J. Clin. Invest. 32, 681 (1953)
- (43) ROTTIER, P.B.: Testing of the Skin for Reaction to Ultraviolet Irradiation. Dermatologica 127, 260 (1963)
- (44) ROTTIER, P.B.: Untersuchungen mit einem kleinen Spektrographen zur Bestimmung der Hautempfindlichkeit gegenüber 300 und 250 nm. Strahlenth. 119, 591 (1962)
- (45) RÜTTENAUER, A.: Über das UV-Normal nach Krefft, Rößler und Rüttenauer. Strahlenth. 63, 171 (1938)
- (46) SAYRE, R.M.,
OLSON, R.L.,
EVERETT, M.A.: Quantitative studies on erythema. J. Invest. Derm. 46, 240 (1966)
- (47) SAYRE, R.M.,
STRAKA, E.R.,
ANGLIN, J.H.,
EVERETT, M.A.: A high intensity ultraviolet light monochromator. J. Invest. Derm. 45, 190 (1965)
- (48) SCHNELL, W.: Ein Zwei-Platten-Multiplier für das Gebiet der ultra- weichen Röntgenstrahlung. Physikalische Diplomarbeit. Universität München (1975)
- (49) SCHNELL, W.,
WIECH, G.: Ein Zwei-Platten-Multiplier für das Gebiet der ultra- weichen Röntgenstrahlung. Mikrochimica Acta 7, 323 (1977)
- (50) SCHRÖDER, W.: Fa. Osram GmbH., München, persönliche Mitteilung.

- (51) SCHULZE, R.: Strahlenklima der Erde.
Verlag Dr. Steinkopf.
Darmstadt (1970)
- (52) SIGMA INSTRUMENTS: Stepping Motor Handbook.
Sigma Instruments, Inc.,
Braintree.
Massachusetts (1972)
- (53) STÜTTGEN, G., Funktionelle Dermatologie
SCHÄFER, H.: Verlag Springer.
Berlin (1974)
- (54) THORNE, A.P.: Spectrophysics.
Verlag Chapman and Hall.
London (1974)
- (55) TIETZE, U., Halbleiter-Schaltungstechnik.
SCHENK, C.: Verlag Springer.
Berlin (1971)
- (56) TRONNIER, H.: Bestimmung der Hautfarbe unter
besonderer Berücksichtigung
der Erythem- und Pigment-
messung.
Strahlenth. 121, 392 (1963)
- (57) TRONNIER, H.: Zum Nachweis der Entstehung
von erythemauslösenden
Stoffen in der Hornschicht
nach UV-Bestrahlung.
Strahlenth. 134, 625 (1967)
- (58) TRONNIER, H.: Zur Bedeutung der Hornschicht
für die Lichtreaktion der
menschlichen Haut.
Strahlenth. 132, 128 (1967)
- (59) TRONNIER, H., Über die UV-Reaktion an der
MERTEN, W.: menschlichen Haut.
Z. f. Haut- u. Geschlechts-
krankheiten 21, 157 (1956)
- (60) TRONNIER, H., Ein Gerät zur Messung des
WAGENER, H.: Rückstrahlvermögens der Haut.
Strahlenth. 83, 549 (1950)
- (61) ULBRICHT, R.: Das Kugelphotometer. Mono-
graphie.
Verlag Oldenbourg.
München (1920)

- (62) URBACH, F.: The Biological Effects of Ultraviolet Radiation. Verlag Pergamon Press. Oxford (1969)
- (63) URBACH, F., BERGER, D. et al. Field Measurements of Biologically Effective UV-Radiation and its Relation to Skin Cancer in Man. CIAP-Report (1974) (DOT ES 00269)
- (64) WISKEMANN, A.: Lichtentzündung und Lichtpigmentierung. Strahlenth. 117, 608 (1962)
- (65) WISKEMANN, A., WISSER, H.: Die Beziehung der direkten Pigmentierung zur Konstitution. Strahlenth. 99, 594 (1956)

XI. ANHANG

Anhang 1:

Abschätzung der aus dem Austrittsspalt austretenden Energie:

Typischer Meßstrom am Photomultiplier
in der Apparatur:

$2 \mu\text{A}$

Empfindlichkeit des 1 P 28 laut
Herstellerangabe:

$8 \times 10^4 \text{ A/W}$

Auf die Photokathode einfallende
Leistung:

$2,5 \times 10^{-11} \text{ W}$

Anhang 2:

Kenndaten des Photomultiplier 1 P 28 (RCA):

Maximale Anoden-Kathoden-Spannung:

1000 V

Maximaler Anodenstrom:

100 μA

Typische Stromverstärkung:

$2,5 \times 10^6$

Empfindlichkeit (Anodenstrom pro
eingestrahlte Leistung)

$8 \times 10^4 \text{ A/W}$

Anhang III:

FORTRAN-Programm zur Bearbeitung von UV-Spektren
(DIRNAGL 1981):

```

PROGRAM UVABC (INPUT,OUTPUT,FSOAT,FSV:KT, GE,
*PIG),
*TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT,TAPE11=FSVEKT,TAPE12=FSOAT,
*TAPE23=PIGD,TAPE24=ERGE)
  DIMENSION FSV(207),FICHV(21),ERYIV(21),PIGV(21),ERY2V(21),
*WELLV(21),FICHC(21,3),ERYIC(21,3),PIGC(21,3),BPAR(4),
*WELLC(21,3),XIOV(21),WELLE(207),ERY2C(21,3),
*ERY1I(207),ERY2I(207),PIGI(207)
  EXTERNAL INT
  DATA FELLV/240.,243.8,248.,252.4,257.,262.2,267.8,
*274.,280.7,288.,296.5,306.,316.,327.,339.8,354.,
*371.,391.,413.5,443.,481./
  DATA ERYIV/.56.,.568.,.57.,.555.,.452.,.335.,.19.,.084,
*0.6.,.23,1.,.17.,.013.,.001,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0./
  DATA ERY2V/1.0,0.99,0.98,0.97,0.90,0.826,0.746,
*0.657,0.61,0.59,0.45,0.17,0.018*0.0/
  DATA PIGV/0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,.324,
*0.696,.924,1.,.938,.716,.39.,.0778,0.,0./
  DATA FICHV/9.56,8.85,8.15,7.46,6.78,6.11,5.45,4.80,
*4.17,3.55,2.93,2.38,1.90,1.47,1.10,0.85,0.65,0.49,
*0.33,0.30,0.25/
  DATA FS//207* -1000./

C
  FUM1(R1) = .17 * EXP(-.26583 * R1)
  FUM2(R2) = .17 * EXP(-.30000 * R2)

C
  DO 5 I=1,21
5  XIOV(I) = 10 * (I-1) + 1
  DATA BPAR/0.,0.,0.,0./
  ERY1S = 0.
  ERY2S = 0.
  PIGS = 0.
  UVA = 0.
  UVP = 0.
  UVC = 0.
  SUABC = 0.
  AMAXV = 0.
C  DO 7 I = 1,207
C  FSV(I) = 0.
C  7 CONTINUE
C
C
1001 J1 = 1
    J2 = 9
    DO 10 I = 1,22
C  READ (11,1000,END=1011)(FSV(J),J=J1,J2)
1000 FORMAT (F5.0,8(1X,F6.0))
    J1 = J1 + 9
    10 J2 = J2 + 9
1011 N = J-1

```

```
CALL ICSICU(X10V,EICHV,21,BPAR,EICHG,21,IER)
CALL ICSICU(X10V,ERY1V,21,BPAR,ERY1G,21,IER)
CALL ICSICU(X10V,ERY2V,21,BPAR,ERY2G,21,IER)
CALL ICSICU(X10V,PIGV,21,BPAR,PIGC,21,IER)
CALL ICSICU(X10V,WELLV,21,BPAR,WELLC,21,ISP)
```

C

```
N = 207
DO 20 I = 1,N 100 100
K = 10
II = I/10 + 1
CALL INT (I,K,EICHG,EICH)
EICH = EICH + EICHV(II)
5000 FORMAT(I4,3(F10.3,2X))
FSV(I) = -FSV(I)
CALL INT (I,K,ERY1G,ERY)
IF (I.GT.130) THEN
113 ERY = 0.
GOTO 112
ELSE IF (I.GE.111) THEN
114 R11 = REAL(I-110)
ERY = FJN1(R11)
GOTO 112
ENDIF
111 ERY = ERY + ERY1V(II)
112 ERY1I(I) = FSV(I) * ERY
CALL INT (I,K,ERY2G,ERY)
IF (I.GT.130) THEN
213 ERY = 0.
GOTO 212
ELSE IF (I.GE.111) THEN
214 R11 = REAL(I-110)
ERY = FJN2(R11)
GOTO 212
ENDIF
211 ERY = ERY + ERY2V(II)
212 ERY2I(I) = FSV(I) * ERY
CALL INT (I,K,PIGC,PIG)
PIG = PIG + PIGV(II)
III=II+1
IF(PIGV(II).EQ.0..AND. PIGV(III).EQ.0.)PIG=0.
PIGI(I) = FSV(I) * PIG
CALL INT (I,K,WELLC,WELL1)
II = I + 1
CALL INT (II,K,WELLC,WELL2)
III = II/10 + 1
WELL*10 = (WELL2 - WELL1 + WELLV(III) - WELLV(II))
WELL(I) = WELLV(II) + WELL1
PIGS = PIGS + PIGI(I) * WELLKO
ERY1S = ERY1S + ERY1I(I) * WELLKO
ERY2S = ERY2S + ERY2I(I) * WELLKO
SUA3C = SUA3C + FSV(I)*WELLKO
IF (I-79)402,402,401
```

```

402 UVC = UVC + FSV(I) * WELLKO
    GOTD 499
401 IF (I-119) 412,412,411
412 UVB = UVB + FSV(I) * WELLKO
    GOTD 499
411 IF (I-174) 422,422,499
422 UVA = UVA + FSV(I) * WELLKO
499 CONTINUE
    AMAXV = AMAX1(AMAXV,FSV(I),ERY1I(I),ERY2I(I),
    *PIGI(I))
    FSV(I) = FSV(I) * EICH
    WRITE(23,5000)I,FSV(I),EPY,PIG,ERY1I(I),ERY2I(I),
    *PIGI(I),WELLKO,WELLE(I)
20 CONTINUE
C
    FAKT = 120./AMAXV
C
    IM1= I - 1
C
    CALL SPEK'L(IM1,FSV,ERY1I,ERY2I,PIGI,FAKT)
C
    WRITE(23,2088)
2088 FORMAT ("I")
    WRITE(23,2076) ERY1S,ERY2S,PIGS,AMAXV,UVA,UVB,UVC,
    *SUABC,FAKT,N
2076 FORMAT (1X,"ERYTHEMSUMME 1 =",F12.2//
    *      1X,"ERYTHEMSUMME 2 =",F12.2//
    *      1X,"PIGMENTSUMME =",F12.2//
    *      1X,"MAX. INTENSITAET =",F12.2//
    *      1X,"U V A - SUMME =",F12.2//
    *      1X,"U V B - SUMME =",F12.2//
    *      1X,"U V C - SUMME =",F12.2//
    *      1X,"A B C - SUMME =",F12.2//
    * 1X,"PLDT-FAKTOR (120 SPALTEN) =",F12.3//
    * 1X,"SCHRITZAHL =",I4)
    STOP
    END
C
    SUBROUTINE INT(I,<,INTV,WERT)
    REAL INTV
    DIMENSION INTV(21,3)
    D = FLOAT(MOD(I,10))
    J = I/10 + 1
    WERT = ((INTV(J,3)*D + INTV(J,2))*D + INTV(J,1))*D
    RETURN
    END
C

```

C

```

SUBROUTINE SPEKPL(N,FSV,ERY1I,ERY2I,PIGI,FAKT)
  CHARACTER*1 Z,F,E1,E2,P,BL
  DIMENSION FSV(207),ERY1I(207),ERY2I(207),PIGI(207)
*,Z(0:120)
  DATA ' ',F,E1,E2,P,3L/121*' ',' ','*','+',',','D',, ' /
  WRITE (23,4200)
  DO 10 I = 1,N
    LF = FAKT * FSV(I)
    Z(LF) = F
    LE1 = FAKT * ERY1I(I)
    Z(LE1) = E1
    LE2 = FAKT * ERY2I(I)
    Z(LE2) = E2
    WRITE(23,2000) I,Z
    Z(LF) = BL
    Z(LE1) = BL
    Z(LE2) = BL
2000 FORMAT(15," ",121A1)
  10 CONTINUE

```

C

```

  WRITE (23,4200)

```

```

4200 FORMAT ("1")

```

C

```

DO 20 I = 1,N
  LF = FAKT * FSV(I)
  Z(LF) = F
  LP = FAKT * PIGI(I)
  Z(LP) = P
  WRITE(23,2000) I,Z
  Z(LF) = BL
  Z(LP) = BL

```

```

20 CONTINUE

```

```

  RETURN

```

```

999 STOP

```

```

  END

```

17.33.33.000, 42000000,

0.70000000.

Am Schluß dieser Dissertation gilt mein besonderer Dank

- Herrn Prof. Dr. med. H. Drexel für die Überlassung des Themas und die freundliche Aufnahme im Institut;
- Herrn Priv.-Doz. J. Kleinschmidt für die intensive Betreuung und tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung und Ausarbeitung der Arbeit;
- Herrn Dipl.-Phys. K. Dirnagl für die Bereitstellung und Anpassung der FORTRAN-Programme und die zahlreichen anregenden Diskussionen;
- Herrn A. Taferner für die präzise Anfertigung der mechanischen Bauteile der Apparatur und das geduldige Eingehen auf Änderungswünsche
- sowie allen übrigen Mitarbeitern des Instituts für Medizinische Balneologie und Klimatologie und nicht zuletzt den Versuchspersonen.

L e b e n s l a u f

Angaben zur Person:

Name: S c h n e l l Walter
Geburtstag und -Ort: 09. Juni 1950 in Schwabmünchen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Heimatadresse: 8930 Schwabmünchen, Geyer-
burgweg 5

Eltern: Dr. med. Josef Schnell und Ehe-
frau Maria, geb. Schöffel

Schulbildung: 1956 - 1960
Volksschule Schwabmünchen;
1960 - 1969
Humanistisches Gymnasium
St. Stephan in Augsburg

Studium an der Lud-
wig - Maximilians-
Universität München: 1969 - 1975
Studium der Physik, Abschluß mit
Diplom 1975;
1976 - 1981
Studium der Humanmedizin,
Approbation am 07. Dez. 1981

Berufliche Tätigkeit: seit 01. April 1982 Assistenz-
arzt an der I. Med. Klinik des
Krankenhauszweckverbandes
Augsburg

